



**TRABAJO FIN DE MASTER EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES**

# **ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS RIESGOS HIGIÉNICOS POR RADIACIONES IONIZANTES EN MEDICINA NUCLEAR**

Juan Gomar Calabuig

**DIRECTOR/ CODIRECTOR**

María José Gil Idoate, Alfonso Cornejo Ibergallartu

**SUBDIRECTOR**

Elena Prieto Azcárate

Pamplona

29 de mayo de 2018



## ÍNDICE

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>II. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>III. CONCEPTOS PREVIOS: RADIACIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Radiaciones Ionizantes (RI).....</b>	<b>11</b>
1.1. Radiaciones Corpusculares.....	13
1.2. Radiaciones Electromagnéticas .....	14
<b>2. Fuentes de radiaciones ionizantes .....</b>	<b>16</b>
2.1. Radiaciones Ionizantes Naturales .....	16
2.2. Radiaciones de Origen Artificial .....	17
<b>3. Magnitudes y Unidades de Medida.....</b>	<b>18</b>
3.1. Ley de Desintegración Radiactiva-Actividad.....	18
3.2. Semivida o Periodo de Desintegración.....	19
<b>4. Unidades de Medida para la RI .....</b>	<b>20</b>
4.1. Radioactividad/ Becquerel.....	20
4.2. Dosis Absorbida/ Gray .....	20
4.3. Dosis Equivalente, Dosis Efectiva y Dosis Colectiva / Sievert.....	20
<b>5. Riesgos Asociados a la Radiación Ionizante: Irradiación Externa y Contaminación.....</b>	<b>21</b>
<b>IV. EFECTOS RI.....</b>	<b>23</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>23</b>
<b>2. Efectos Biológicos de la Radiación.....</b>	<b>24</b>
2.1. Efectos según el tiempo de exposición.....	24
2.2. Efectos Según el Tipo de Célula Afectada .....	24
2.3. Efectos Estocásticos y Deterministas .....	25
<b>3. Efectos de la Radiación a Nivel Celular y Manifestaciones Clínicas</b>	<b>26</b>
3.1. Lesiones por Efectos Deterministas .....	27
3.2. Lesiones Por Efectos Estocásticos.....	28

<b>V. MEDICINA NUCLEAR .....</b>	<b>31</b>
<b>1. Obtención de Radionucleidos .....</b>	<b>32</b>
1.1. Generadores de Radionucleidos .....	32
1.2. Ciclotrón .....	33
<b>2. Obtención de Radiofármacos .....</b>	<b>33</b>
<b>3. Vías de Administración del Radiofármaco .....</b>	<b>35</b>
<b>4. Radionucleidos Utilizados.....</b>	<b>36</b>
<b>5. Riesgos Específicos: Irradiación, Contaminación .....</b>	<b>37</b>
 <b>VI. MEDIDAS PREVENTIVAS PROFESIONALES EN MEDICINA</b>	
<b>NUCLEAR39</b>	
<b>1. Justificación de Uso de RI Según Organismos Internacionales y CSN</b>	<b>39</b>
<b>2. Criterio ALARA .....</b>	<b>40</b>
<b>3. Límite de Dosis y Tipo de Trabajadores .....</b>	<b>41</b>
<b>4. Instalaciones. Clasificación y Delimitación de Zonas.....</b>	<b>43</b>
<b>5. Normas Generales de Seguridad .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Protección Personal Especialmente Sensible; Embarazadas.....</b>	<b>46</b>
<b>7. Dosimetría .....</b>	<b>46</b>
<b>8. Establecimiento de Protocolos.....</b>	<b>48</b>
8.1. Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica .....	48
8.2. Plan de Emergencia .....	51
 <b>VII. RESIDUOS RADIATIVOS .....</b>	<b>55</b>
 <b>VIII. CASO PRÁCTICO .....</b>	<b>59</b>
<b>1. Descripción del Centro de Trabajo.....</b>	<b>59</b>
<b>2. Puestos de Trabajo .....</b>	<b>62</b>
<b>3. Focos del Riesgo .....</b>	<b>66</b>
<b>4. Datos de Mediciones de RI.....</b>	<b>69</b>
 <b>IX. CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
 <b>X. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>83</b>
<b>LEGISLACIÓN APLICABLE EN PREVENCIÓN DE PERSONAL</b>	
<b>SANITARIO.....</b>	<b>83</b>

OTRA NORMATIVA Y LEGISLACIÓN DE POSIBLE APLICACIÓN O INTERÉS.....	83
<b><i>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</i> .....</b>	<b>84</b>



**ABSTRACT**

The aim of the present work is to analyze the hygienic risks resulting from the exposure to Ionizing Radiations of workers specialized in Nuclear Medicine as well as the systems and protocols used to prevent the exposure risk.

Thus, we describe the nature and characteristics of Ionizing Radiations, how they interact with the matter and what are the mechanisms by which they may produce biological damage in human beings. We also describe the procedures for preventing and reducing the risk based on current regulations and knowledge of the subject.

In addition, we have investigated the exposure level in the Department of Nuclear Medicine of one Spanish hospital by analyzing the annual exposure data of its personnel. This study allowed us to have an assessment of the current situation and to propose possible ways to reduce the risk of exposure.

**KEY WORDS: Prevention, Ionizing Radiation, Nuclear Medicine**

**RESUMEN**

La finalidad del presente trabajo ha consistido en el estudio, análisis y prevención de los riesgos higiénicos derivados de la exposición a Radiaciones Ionizantes en el desempeño del trabajo diario de los trabajadores especialistas en Medicina Nuclear.

Para ello se ha realizado un análisis de las Radiaciones Ionizantes, cómo interactúan con la materia y los daños que pueden causar al ser humano y cómo prevenir y reducir el riesgo a la luz de la normativa y conocimientos actuales en la materia.

Se ha procedido a valorar el nivel de exposición, mediante el estudio de los datos de exposición anual obtenidos de un centro hospitalario, concluyendo en una valoración de la situación actual y proponiendo posibles mejoras encaminadas a reducir dichos niveles.

**PALABRAS CLAVE: Prevención, Radiaciones Ionizantes, Medicina Nuclear**





## **I. INTRODUCCIÓN**

El objeto del presente trabajo consiste en el estudio, análisis y prevención de los riesgos higiénicos derivados de la exposición a radiaciones ionizantes a los que están sometidos los trabajadores especialistas en Medicina Nuclear en el desempeño diario de sus tareas en el centro de trabajo.

La Medicina Nuclear es la especialidad médica que emplea Isótopos Radiactivos para la obtención de imágenes destinadas a la diagnosis de determinadas enfermedades, así como para la elaboración de radiofármacos utilizados en el tratamiento de procesos cancerosos, hipertiroidismo, o paliativos. En definitiva, es el empleo de RI para aplicaciones médicas.

La justificación del empleo de Radiaciones Ionizantes viene determinada por el beneficio obtenido frente a los posibles inconvenientes derivados del riesgo del uso de las mismas, tanto en profesionales como en pacientes, en lo que viene a denominarse economía de prevención.

La medicina nuclear no es cara y la información que aporta puede ser extremadamente útil para el diagnóstico y el tratamiento del paciente. Es una información mucho más detallada y menos agresiva que la obtenida mediante cirugía exploratoria ya que permite detectar enfermedades en un estado temprano, indicar si es necesaria una biopsia y dónde realizarla en su caso, ofreciendo además información adicional para tratamientos con radioterapia.

Sin embargo, dicha radiación puede entrañar un peligro para la salud de las personas que se ven afectadas por la misma, pudiendo provocar efectos perjudiciales, entre ellos daños en el ADN, causantes de transformación maligna de las células y desarrollo de tumores potencialmente letales.

La relación entre exposición a radiaciones ionizantes y aparición de procesos cancerosos hace que la utilización de instalaciones de medicina nuclear esté asociada a unos riesgos que exigen la adopción de medidas y controles estrictos para minimizar la exposición de los usuarios. De hecho, ya en 1997 la Comisión Internacional de Protección Radiológica (IRCP por sus siglas en inglés) indicó que las radiaciones ionizantes sólo deben ser empleadas si su utilización está justificada.

Dado que el personal de Medicina Nuclear está sometido al riesgo derivado del uso de Radiaciones Ionizantes, es necesario tener un conocimiento previo de las

radiaciones, sus tipos, y riesgos que implica su uso para la salud del ser humano, a fin de comprender la magnitud de dicho riesgo y la efectividad de las medidas preventivas que se planteen. También es necesaria una correcta identificación de los puestos de trabajo en Medicina Nuclear.

En esta Memoria, además de los aspectos citados, se analizan las características propias de dicha especialidad médica, actividades que se desarrollan en los servicios de medicina nuclear, isótopos radiactivos, y tipo de radiación utilizados, y las condiciones en que se desarrolla el trabajo diario. Para ello, además de la documentación publicada al respecto, se ha contado con la experiencia de trabajadores de dos servicios diferentes de Medicina Nuclear; se ha analizado la normativa existente y comprobado el cumplimiento de la misma.

Se extraen, finalmente, conclusiones con respecto a la situación actual en materia de seguridad y salud de los trabajadores especialistas en Medicina Nuclear, y se analiza si las actuaciones actuales en materia de prevención son eficaces, si se ajustan a la norma existente en este momento y si pueden ser susceptibles de mejora.

## **II. OBJETIVOS**

Son objetivos de esta memoria:

1. Establecer los riesgos para la salud que se derivan de la exposición a radiaciones ionizantes.
2. Estudiar las condiciones laborales de los trabajadores de los servicios de medicina nuclear, en especial su acomodación a la normativa legal vigente
3. Dar recomendaciones para la mejora de la seguridad laboral en este ámbito.



### III. CONCEPTOS PREVIOS: RADIACIÓN

La radiación es la energía que se propaga a través del espacio tanto en forma de onda como de partículas. Dentro de este concepto se incluyen, entre otros, a las **radiaciones no ionizantes**, como la luz visible o infrarroja, o las ondas de radio, y a las **radiaciones ionizantes**. [1] [2]

**Según su naturaleza** las radiaciones pueden clasificarse en

*Radiaciones Electromagnéticas:* Tienen su origen en una propagación ondulatoria de la energía eléctrica y magnética, teniendo todas ellas la misma velocidad de propagación (300.000 km/s en el vacío), difieren unas de otras por su longitud de onda, siendo las de menor longitud de onda las que poseen mayor energía.

*Radiaciones Corpusculares:* Son debidas a la propagación de partículas subatómicas a gran velocidad, aunque ésta es menor que en el caso de las radiaciones electromagnéticas.

**Según posean o no capacidad de ionizar al átomo** se clasifican en:

*Radiaciones ionizantes:* Son aquellas capaces de ionizar al átomo, pudiendo ser a su vez ser de naturaleza electromagnética o corpuscular.

*Radiaciones no ionizantes:* Son aquellas carentes de la capacidad de ionizar. Son de tipo electromagnético y engloban las radiaciones ópticas correspondientes al espectro visible, ultravioleta, infrarrojo, microondas y de radiofrecuencia.

En este apartado nos centraremos en el conocimiento de las radiaciones ionizantes (RI), haciendo especial énfasis en las utilizadas en medicina nuclear.

#### 1. Radiaciones Ionizantes (RI)

Las radiaciones ionizantes empleadas en medicina nuclear son producidas por nucleidos, y en mayor o menor medida presentan un componente de riesgo por contaminación y un componente de riesgo por irradiación externa, a excepción en este último caso de las radiaciones alfa.

Se denominan radiaciones ionizantes a todas aquellas partículas (electrones, neutrones, protones, partículas alfa, fotones) que tienen la propiedad de penetrar en la materia y producir ionización en los átomos constituyentes de la misma, bien arrancando o aportando un electrón. En el caso de los fotones (partícula asociada a la radiación electromagnética) sólo aquellos con suficiente energía para extraer electrones de los

átomos (rayos X y radiación gamma) son radiaciones ionizantes. [3] El origen de estas radiaciones es siempre atómico, pudiéndose producir tanto en el núcleo del átomo como en los orbitales.

Desde el descubrimiento de la radiactividad a finales del siglo XIX por Becquerel, se han producido grandes avances en el conocimiento de sus efectos sobre la materia y en particular sobre los organismos vivos. La radiactividad o desintegración radiactiva es una característica común a algunos átomos en los que el número protones y de neutrones del núcleo es tal que da como resultado un átomo inestable, conocido comúnmente como isótopo radiactivo. En estos casos, los núcleos inestables se reestructuran o se desintegran emitiendo el exceso de energía por distintos mecanismos para transformarse finalmente en otros isótopos estables.

La radiación emitida puede ser tanto *corpuscular*, partículas  $\alpha$ , partículas  $\beta$ , neutrones, como *electromagnética*, rayos  $\gamma$  y Rayos X, mostrando cada una de ellas características diferentes, siendo importante considerar su capacidad de ionización y su capacidad de penetración, que en gran parte son consecuencia de su naturaleza.

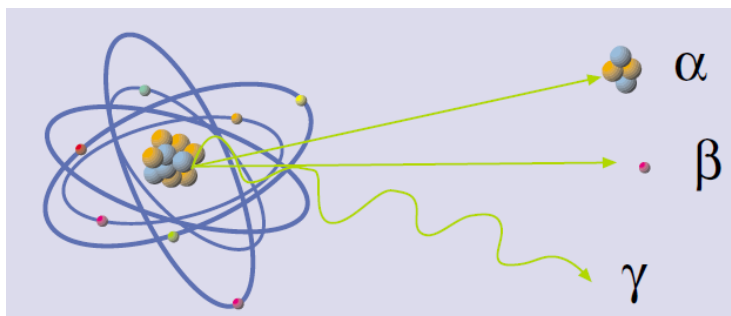


Figura 1: Emisión radiación  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$

La capacidad de penetración de la radiación depende en gran medida de su longitud de onda, siendo esta capacidad mayor cuanto menor es la longitud de onda asociada a la radiación.

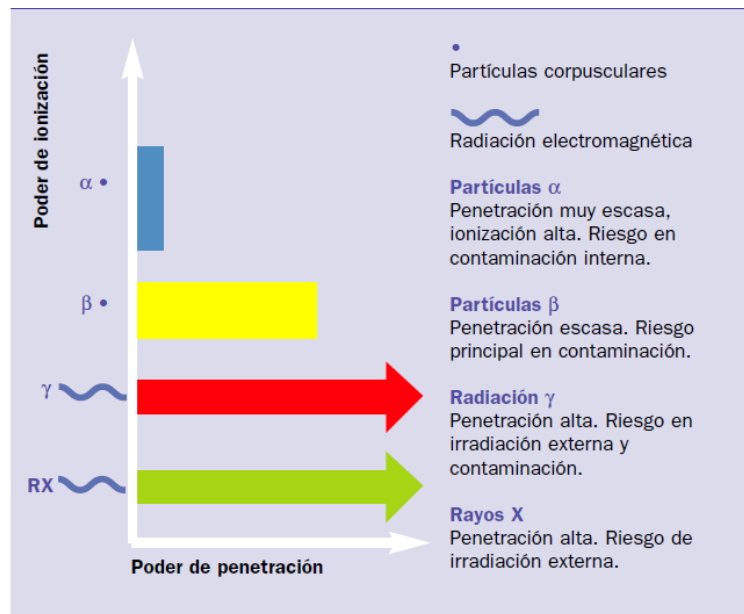


Figura 2: Poder de penetración e ionización de radiación  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$

### 1.1. Radiaciones Corpusculares

Las radiaciones corpusculares consisten en energía ligada a partículas subatómicas dotadas de gran velocidad y por tanto con energía elevada. Dichas partículas pueden estar o no cargadas eléctricamente.

#### 1.1.1. Radiación $\alpha$

Las partículas alfa están formadas por 2 protones y 2 neutrones, es decir, el equivalente al núcleo de un átomo de Helio poseyendo por tanto doble carga positiva. Poseen un gran poder ionizante y constituyen las radiaciones de mayor peso y energía. Sin embargo, tienen menor capacidad de penetración que el resto de radiaciones ionizantes no siendo capaces de atravesar una capa de aluminio de 0,1 mm, ni tampoco el espesor de la piel humana, lo que reduce el daño por radiación. No obstante, debido a su notable capacidad de interactuar con otros elementos, son altamente contaminantes.

La energía de las partículas  $\alpha$  emitidas por radionucleidos naturales se encuentra entre 1,8 MeV ( $^{144}\text{Nd}$ ) y 8,785 MeV ( $^{212}\text{Po}$ ).

#### 1.1.2. Radiación $\beta$

Son ampliamente utilizadas en medicina nuclear, tanto para el radiodiagnóstico como para el tratamiento de enfermedades tumorales. Existen dos formas de emisión de radiación beta:

- a) Radiación beta positiva ( $\beta^+$ ): Se emite un *positrón* debido a la transformación de un protón en un neutrón, dando lugar al elemento atómico inmediatamente anterior de la tabla periódica, pero con la misma masa.
- b) Radiación beta negativa ( $\beta^-$ ): Se produce cuando un neutrón se transforma en un protón y se convierte en el átomo posterior de la tabla periódica, pero manteniendo su masa atómica, con la emisión de una partícula  $\beta^-$

Aunque la radiación beta tiene menor capacidad ionizante que la alfa, su capacidad de penetración es mayor, siendo capaz de traspasar la piel, pero no así el tejido subcutáneo. De este modo, tanto una lámina de plomo de 0,1 mm de espesor como una de aluminio de 5 mm son capaces de detener dicha radiación.

El rango de energía de las emisiones beta está entre los 17 keV para el tritio ( $^3\text{H}$ ) y los 1,7 MeV para el ( $^{32}\text{P}$ ). Por todo ello, las radiaciones beta suponen un riesgo de irradiación y también de contaminación, siendo este último más importante.

#### 1.1.3. Neutrones y Rayos Cósmicos

Ambas radiaciones corresponden a partículas procedentes del espacio exterior, aunque en el caso de los neutrones también pueden proceder de colisiones de partículas en la atmosfera terrestre o de desintegraciones radiactivas. Poseen gran energía y capacidad de penetración.

Los rayos cósmicos proceden exclusivamente del espacio exterior y debido a la protección que confiere la capa de ozono, la exposición a los mismos es mayor a altitudes elevadas, perdiendo intensidad cuando más cerca se está del nivel del mar.

Ninguna de las dos tiene relevancia en el campo de la medicina nuclear.

#### 1.2. Radiaciones Electromagnéticas

La radiación electromagnética viaja formando paquetes discretos de energía, lo que se conoce como cuantos energéticos llamados fotones. Estos poseen una energía que se relaciona directamente con la frecuencia de la onda, tal y como se expresa en la ecuación de Planck:

$$E = h \cdot \nu \qquad c = \nu \cdot \lambda \qquad E = h \cdot c / \lambda$$

Dónde: E= energía; h= constante de Planck;  $\nu$  = Frecuencia; c= velocidad de la luz;  $\lambda$  = longitud de onda.



Por lo tanto, tanto frecuencia como longitud de onda de una radiación electromagnética están relacionadas entre sí a través de la velocidad de propagación de una radiación electromagnética,  $c$ . En función de la longitud de onda y su frecuencia, la radiación electromagnética podrá clasificarse en una región u otra del espectro electromagnético (Fig. 3).

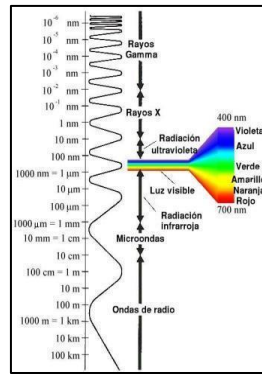


Figura 3: espectro de ondas electromagnéticas

De este modo, entre las ondas electromagnéticas, aquellas con capacidad ionizante son las que tienen una longitud de onda menor y por lo tanto, elevada frecuencia y mayor energía asociada. Entre ellas están los Rayos X ( $\lambda \approx 10^{-7}$  m y  $\nu \approx 10^{20}$  Hz) y las Radiaciones Gamma ( $\lambda \approx 10^{-20}$  m y  $\nu \approx 10^{24}$  Hz).

#### 1.2.1. Radiaciones Gamma

La radiación  $\gamma$  es muy utilizada en medicina nuclear tanto para radiodiagnóstico como determinados tratamientos oncológicos, mediante radioterapia. Dicha radiación se obtiene a partir de materiales radiactivos como son el Tecnecio 99 ( $^{99}\text{Tc}$ ) y el Cobalto 60 ( $^{60}\text{Co}$ ).

Se trata de una radiación de naturaleza electromagnética que como tal carece de masa. Por lo general, tiene su origen en el núcleo excitado de un átomo, a menudo tras emitir éste una partícula alfa o beta, en el que queda una energía remanente que es emitida en forma de radiación electromagnética de alta frecuencia.

Tiene, por lo tanto, mucha capacidad penetrante, pudiendo atravesar cientos de metros de aire, el cuerpo humano y materiales de baja densidad o peso específico, siendo detenidas por láminas de plomo de 12 mm de espesor, el agua y muros o capas de hormigón de espesor considerable. La energía de los fotones de radiación gamma se encuentra, en los casos más habituales, entre 1 keV y 1 MeV.

Aunque poseen menor capacidad de ionización que las partículas alfa y beta, su gran poder de penetración las hace peligrosas en cuanto a la radiación, y aunque algo menos que dichas partículas, también en cuanto a la contaminación (radiación interna).

#### 1.2.2. Rayos X

Los Rayos X se producen por el choque de electrones acelerados a gran velocidad contra la materia. Como en el caso de la radiación gamma, poseen gran capacidad de penetración, aunque no son tan ionizantes como las partículas alfa y beta siendo la energía de los rayos X de alrededor de los 100 kV para los rayos X de diagnóstico y entre 15 kV y 50 kV en los equipos para análisis.

Suponen un riesgo elevado por radiación externa, pero no por contaminación, ya que son generados artificialmente, no existiendo partículas contenedoras de dicha radiación. De hecho, los Rayos X empleados en medicina se producen de manera artificial mediante generadores de rayos X para radiodiagnóstico, dejando de emitir radiación en cuanto se desconecta el equipo que las produce. No obstante, no son empleados por la especialidad de medicina nuclear.

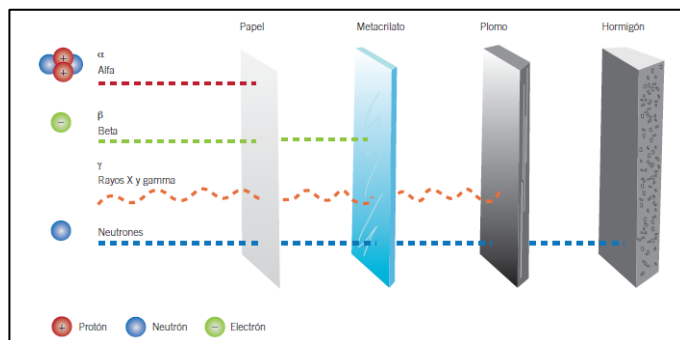


Figura 4: Poder de penetración y blindaje de las radiaciones radiación  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$

## 2. Fuentes de radiaciones ionizantes

### 2.1. Radiaciones Ionizantes Naturales

Aunque no seamos conscientes de ello, las R.I. forman parte de nuestra vida cotidiana. Esta R.I. de origen natural, también llamada de fondo, puede tener diversos orígenes, como son los rayos cósmicos, la tierra y sus componentes, como minerales y gases, el aire que respiramos e incluso nosotros mismos.

Alrededor de un 10% de la exposición anual a la radiación de fondo, procede de los *rayos cósmicos*. Dichos rayos interactúan con elementos estables de la atmósfera produciendo los radionucleidos cosmogénicos, como el Berilio-7 ( $^7\text{Be}$ ), el Titrio-3 ( $^3\text{H}$ ) y

el Carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) siendo dicha radiación cósmica la fuente principal de estos radionucleidos en la tierra.

Por otro lado, cuando se produce la desintegración del elemento radiactivo *uranio presente en la corteza terrestre*, éste desprende un gas radiactivo llamado Radón, siete veces más pesado que el aire. Permanece en el aire a bajas concentraciones, sin embargo, en sitios cerrados con poca ventilación, como edificios, su concentración puede ser mayor. La liberación de gas radón depende del tipo de suelo y su riqueza en uranio, siendo las zonas con suelos de granito las que presentan mayor concentración de Radón.

Otra fuente de RI es la presencia de materiales radiactivos en la corteza terrestre como el carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ), el potasio-40 ( $^{40}\text{K}$ ) y el tritio ( $^3\text{H}$ ). Dichos materiales son absorbidos por las plantas, animales y disueltos en el agua, aunque sus concentraciones son tan bajas que las dosis que se reciben de dichos nucleidos no suponen riesgos para la salud.

De este modo, todo el conjunto de la población mundial recibe una intensidad de RI de origen natural constante a lo largo del año, siendo la dosis media per cápita estimada de 2,4 mSv/ año aproximadamente. [4]

## 2.2. Radiaciones de Origen Artificial

Las radiaciones de origen artificial poseen las mismas características que las anteriores pero son producidas por el hombre para su utilización en diversas aplicaciones, como es el caso de la medicina nuclear. Éstas son más fáciles de controlar que las naturales y constituyen una proporción de radiación muy baja frente a las primeras.

El isótopo radiactivo que más comúnmente se emplea en la producción de radiación artificial es el Uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ), el cual es ligeramente inestable. Sin embargo, cuando este isótopo capta un neutrón da lugar a Uranio-236 ( $^{236}\text{U}$ ) que es altamente inestable y se desintegra violentamente. Este tipo de energía procedente de un nucleido, puede generar a su vez una radiación de origen corpuscular ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) y radiación  $\gamma$  emitiendo una radiación que decae de forma exponencial con el tiempo.

Tal y como se ha mencionado, otro tipo de radiación artificial muy comúnmente empleada es la procedente de los Rayos X.

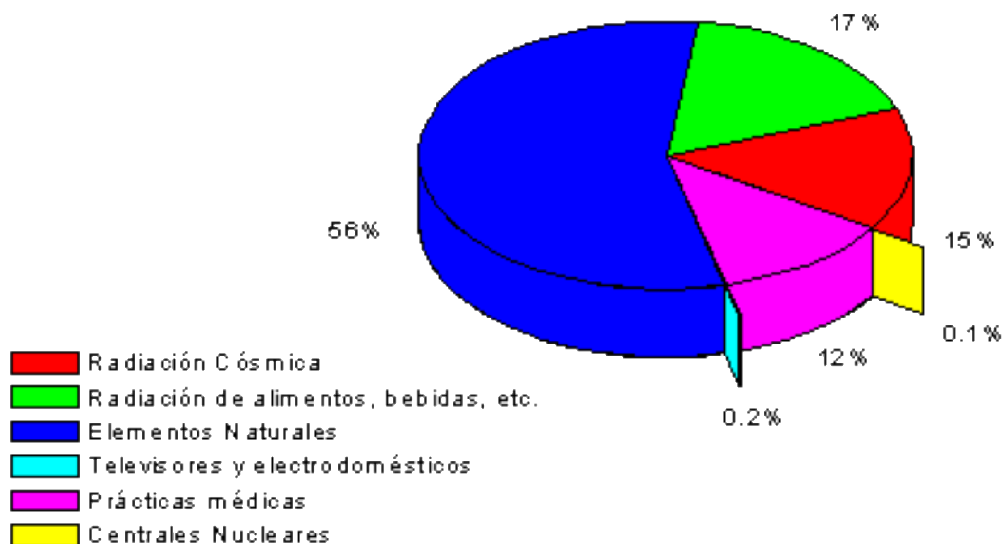


Figura 5: Contribución de las diferentes radiaciones a la radiación recibida por el hombre

### 3. Magnitudes y Unidades de Medida

#### 3.1. Ley de Desintegración Radiactiva-Actividad

La radiactividad que tiene su origen en los nucleidos es producida por el proceso de desintegración de los mismos. En 1902 Frederick Soddy y Ernest Rutherford, establecieron que la velocidad con que una sustancia radiactiva emite partículas radiactivas disminuye exponencialmente con el tiempo. El número de núcleos  $N$  que se desintegran en un intervalo de tiempo es directamente proporcional a una constante de desintegración y al número de núcleos existentes, de acuerdo con una cinética de orden uno para los núcleos.

$$-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$$

$$-dN / N = \lambda \cdot dt$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde  $N(t)$  = número de núcleos radiactivos en un instante;  $dN$  = número de desintegraciones en el tiempo  $t$ ;  $N$  = número de núcleos que quedan por desintegrar

$N_0$  = número de núcleos iniciales

$N_0 - N$  = número de núcleos desintegrados

$\lambda$  = constante de desintegración

Como el fenómeno de radiactividad es aleatorio y está sujeto a cierta probabilidad de desintegración, la constante  $\lambda$  puede entenderse como la probabilidad por unidad de

tiempo de que los núcleos de una población de una sustancia radiactiva se desintegren. [5]. En lugar de referirnos al número de núcleos presentes en la muestra,  $N$ , es habitual referirse a la **ACTIVIDAD**, que se define como el número de núcleos que se desintegran en la unidad de tiempo, es decir, es la tasa de desintegración de una muestra. [6]

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

La unidad de medida de la **ACTIVIDAD** en el sistema internacional es el Becquerelio (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo. La unidad en el sistema cegesimal es el Curio (Ci) que equivale a  $3,7 \times 10^{10}$  Bq.

### 3.2. Semivida o Periodo de Desintegración

Es el tiempo necesario ( $t_{1/2}$ ) para que la actividad de un radionucleido se reduzca a la mitad. Es la medida que se emplea para determinar cuándo la actividad decae lo suficiente como para no considerarse peligrosa para el ser humano. Un isótopo radiactivo será, por lo tanto, más peligroso cuando tenga una semivida mayor. Esta magnitud es muy variable de unos radionucleidos a otros: El Radio-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), por ejemplo, tiene un periodo de semidesintegración de  $1,6 \times 10^3$  años, mientras que el Yodo-132 ( $^{132}\text{I}$ ) lo tiene de 2,3 horas.

Se puede estimar  $t_{1/2}$  sustituyendo  $N$  por  $N_0/2$ :

$$N = N_0 / 2$$

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

ELEMENTO	SEMIVIDA	TIPO DE DESINTEGRACIÓN
$^{238}\text{U}$	$4,51 \times 10^9$ años	$\alpha$
$^{234}\text{U}$	$2,48 \times 10^5$ años	$\alpha$
$^{234}\text{Th}$	24,1 días	$\beta$ y $\gamma$
$^{226}\text{Ra}$	1620 años	$\alpha$ $\psi$ $\gamma$
$^{222}\text{Rn}$	3,82 días	$\alpha$
$^{218}\text{Po}$	3,05 minutos	$\alpha$
$^{214}\text{Po}$	$1,64 \times 10^{-4}$ segundos	$\alpha$

Tabla 1: Períodos de semidesintegración de varios radionucleidos

## 4. Unidades de Medida para la RI

### 4.1. Radioactividad/ Becquerel

Se denomina radiactividad a la actividad que tiene un radionucleido; su unidad de medida es el Becquerel y guarda relación con la velocidad a la que suceden las transformaciones en los nucleidos correspondiendo al número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo.

$$\text{Bq} = 1 \text{ desintegración / segundo}$$

Se trata realmente de una unidad muy pequeña y poco práctica (nuestro organismo contiene una actividad de aproximadamente unos 4.000 Bq de  $^{40}\text{K}$ ), por lo que comúnmente se emplean siempre múltiplos.

### 4.2. Dosis Absorbida/ Gray

Es muy importante no confundir la actividad o la energía de la radiación con la **dosis**, que es una medida relacionada con el efecto que causa la radiación sobre el receptor. La dosis depende tanto de la energía que se libera en el receptor como de la calidad de la radiación. [7]

Corresponde con la cantidad de energía que es cedida por la RI por unidad de masa del material con el que interacciona. Su unidad de medida es el Gray correspondiendo a

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ J / kg}$$

### 4.3. Dosis Equivalente, Dosis Efectiva y Dosis Colectiva / Sievert

La *dosis equivalente* es la cantidad de dosis de radiación absorbida por un tejido vivo. Es la magnitud que se emplea en radioprotección para valorar los efectos biológicos de una determinada dosis absorbida de RI. La medida de *dosis equivalente* se calcula teniendo en cuenta la diferente eficacia biológica de las distintas clases de radiación sobre el medio vivo considerado, para lo que se emplean “factores de ponderación de la radiación”

La *dosis efectiva* es la dosis equivalente ponderada por la diferente sensibilidad de los distintos órganos y tejidos del cuerpo humano. Los factores de corrección se llaman “factores de ponderación de los tejidos” que se recogen en el Anexo II del RD 783/ 2001.

En ambos casos, la unidad de medida es el Sievert (Sv) que representa la unidad de dosis absorbida,

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J / kg}$$

De esta manera, para medir la dosis absorbida por un individuo en su conjunto, nos referimos a *dosis equivalente*, mientras que, si se habla de dosis recibida en un órgano o tejido concreto, como puede ser el cristalino, estaremos hablando de *dosis efectiva*, que corresponde con la suma ponderada de radiaciones medias recibidas por los distintos órganos humanos.

Finalmente, la *dosis colectiva* es la suma de las dosis efectivas recibidas por un colectivo de una población que esté expuesta a una misma fuente de radiación, con lo que se pueden establecer comparaciones útiles con respecto al impacto producido por las distintas fuentes.[8]

## **5. Riesgos Asociados a la Radiación Ionizante: Irradiación Externa y Contaminación.**

La dosis absorbida, la dosis equivalente y la exposición están relacionadas con la irradiación externa, mientras que la actividad lo está con la contaminación.

### **Irradiación externa**

Se dice que hay riesgo de *irradiación externa* cuando hay transferencia de energía de un material radiactivo a otro material sin contacto físico entre ellos. La persona sólo está expuesta mientras la fuente de radiación está activa. Es el caso de los generadores de rayos X, los aceleradores de partículas y la utilización o manipulación de fuentes encapsuladas.

Existe riesgo de *contaminación radiactiva* cuando el organismo entra en contacto con la sustancia radiactiva y ésta puede penetrar en el organismo por cualquier vía (respiratoria, dérmica, digestiva o parenteral).





## IV. EFECTOS RI

### 1. Introducción

Es comprensible pensar que una energía capaz de arrancar electrones de un átomo pueda producir efectos perjudiciales en los organismos vivos y por tanto afectar a la salud de los seres humanos que se ven sometidos a ellas. La probabilidad de que dicho daño se produzca y su gravedad dependen de factores propios de la radiación y del organismo afectado.

*Factores propios de la radiación*, influyen: la dosis suministrada, la tasa de dosis, el fraccionamiento de la misma y la calidad de la radiación.

- De esta manera cuanto más alta es la dosis y la tasa de dosis, más efectos nocivos puede producir sobre el individuo además de reducir la posibilidad de regeneración celular.

- El efecto de una dosis en una sola aplicación produce un daño celular mayor que en aplicaciones sucesivas separadas por un intervalo de tiempo determinado dado que durante dicho intervalo puede producirse una regeneración celular.

- La calidad de la RI viene definida por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU) en referencia a la Transferencia Lineal de Energía, LET (LET= dE/dl) que corresponde con la cantidad de energía media cedida por una partícula en una distancia de una micra (KeV/ $\mu$ m). Las radiaciones *alfa* y las propias de *neutrones* pertenecen al tipo de alta LET, con un efecto localizado muy significativo, por lo que los tejidos inmediatamente cercanos a la fuente de radiación se ven altamente afectados. Por otro lado, las radiaciones *gamma* y de *rayos X*, son radiaciones de baja LET. Sin embargo al ser partículas más ligeras tienen una capacidad mayor de penetración y por ello presentan un riesgo elevado por radiación externa y menor por contaminación o radiación interna.

	High LET	Low LET	
particles	$\alpha$ p	e- $\beta^-$ $\beta^+$	"electrons"
		$\gamma$ ray x ray	electromagnetic radiation

Radiaciones	LET (KeV/micra)
Rayos X Co 60	0.2
Rayos X 250 KV	2.0
Protones 10 MeV	4.7
Protones 150 MeV	0.5
Neutrones 14 MeV	100
Partículas alfa 2.5 MeV	166
Iones Fe 2 GeV	1000

Tabla 2: esquema de alta y baja actividad

*Factores debidos a las características del individuo*, los factores fundamentales serán la edad, género, salud del individuo irradiado y zona u órgano que recibe la radiación. Las células más sensibles a la radiación son aquellas menos estables, como las que están en división. Del mismo modo son más sensibles los individuos jóvenes que los adultos, siendo extremadamente sensible el feto. Las células germinales de las mujeres no se regeneran como las de los hombres, por lo que son más susceptibles de transmitir cualquier alteración genética a su progenie.

## **2. Efectos Biológicos de la Radiación**

En este apartado se van a describir los efectos que produce la RI en el organismo tanto a nivel celular como los efectos para la salud de las personas sometidas a radiación. Los efectos se clasifican según diferentes parámetros

### *2.1. Efectos según el tiempo de exposición*

- *Efectos inmediatos*: Los efectos producidos por la radiación se manifiestan en apenas unas horas o semanas, pudiendo ser efectos focalizados con enrojecimiento de la piel afectando a zonas reducidas, o bien puede llegar a provocar la muerte si el efecto se da de un modo generalizado por todo el cuerpo. En ambos casos se trata de una radiación aguda que suele llevar aparejada la muerte de las células que se ven afectadas por ella. Al tratarse de efectos que se producen a las pocas horas de haber sido sometido a la radiación, son fácilmente detectables.

- *Efectos tardíos*: Son aquellos que se producen cuando el individuo está sometido a bajas dosis de radiaciones ionizantes por un periodo de tiempo prolongado, pudiendo provocar enfermedades congénitas y cáncer. A diferencia del caso anterior no suelen llevar aparejada la muerte celular, pudiendo pasar desapercibidos, lo que hace más difícil establecer una relación causa-efecto con las posibles enfermedades producidas.

### *2.2. Efectos Según el Tipo de Célula Afectada*

Los efectos pueden ser somáticos o hereditarios.

- *Efectos somáticos*: Se producen cuando las células que se ven afectadas son células maduras, denominadas somáticas. En este caso las células más estables presentan una mayor resistencia a la RI. Aquellas que están en proceso de división, como pueden ser las generadoras de células sanguíneas, pueden dar lugar a células hijas con

malformaciones, pero éstas no son hereditarias, sino que forman parte del individuo adulto.

- Efectos genéticos o hereditarios: cuando las células que se ven afectadas por la RI son células germinales o reproductoras, cuyo ADN se ve afectado, pudiendo producir malformaciones en la descendencia del individuo.

### 2.3. Efectos Estocásticos y Deterministas

La Comisión Internacional de Protección Radiológica, en adelante CIPR o bien ICRP por sus siglas en inglés, tiene en consideración la dosis a la que es sometido el individuo y el umbral a partir del cual dicha dosis puede ser perjudicial, para determinar la peligrosidad de una sustancia química. Clasifica los efectos en estocásticos y deterministas.

CARACTERÍSTICAS	EFFECTOS ESTOCÁSTICOS	EFFECTOS DETERMINISTAS
Gravedad	Independiente de la dosis	Dependiente de la dosis
Mecanismo	Lesión subletal (de una o pocas células)	Lesión letal de muchas células
Naturaleza	Somáticos o teratogénicos Genéticos	Somáticos
Dosis Umbral	No	Sí
Relación dosis- efecto	Lineal	Sigmoidea
Aparición	Tardía	Inmediata o tardía

Tabla 3: características efectos estocásticos y deterministas

#### 2.3.1. Efectos Deterministas

Aparecen como consecuencia de la exposición a niveles altos de radiaciones ionizantes. Tienen lugar a partir de una determinada dosis, *dosis umbral*, para la que considera que los efectos se manifiestan en un 5% de la población expuesta. El efecto aumenta con el aumento de la dosis, llegando incluso a provocar la muerte del individuo, aunque también pueden ser de gravedad aguda o leve.

Cuando la exposición aguda se da en todo el cuerpo, se produce lo que se conoce como Síndrome Agudo de Radiación (SAR). Depende de la cantidad de dosis irradiada y del tiempo de exposición, siendo necesaria una alta dosis de radiación como sucede en los accidentes nucleares, que no se alcanza en los entornos de trabajo habituales de los Servicios de Medicina Nuclear.

Sin embargo, el efecto de la radiación es acumulativo, por lo que conviene realizar seguimientos de la radiación a la que puede verse sometida la población laboral durante un periodo prolongado de tiempo. [9]

### 2.3.2. Efectos Estocásticos o Probabilísticos

Son aquellos efectos producidos por las radiaciones que no dependen de un umbral determinado y cuya probabilidad de aparición es mayor cuanto más cantidad de radiación es recibida por el individuo. En consecuencia, la protección radiológica asume que la probabilidad de que se produzca un daño es lineal respecto a la dosis recibida, no existiendo una dosis mínima umbral por debajo de la cual no se produzca dicha probabilidad.

Es por esto que se considera que cualquier radiación por pequeña que sea es nociva, lo que hace que la protección radiológica del personal que trabaja con radiaciones ionizantes se centre especialmente en estos tipos de efectos para reducir la exposición en la medida de lo posible.

Una vez aparecido el daño, la gravedad del mismo no depende de la cantidad ni de la calidad de la radiación recibida. La consecuencia negativa más característica de los efectos estocásticos es el cáncer, aunque también puede haber efectos genéticos hereditarios si las células que se ven afectadas son germinales.

## 3. Efectos de la Radiación a Nivel Celular y Manifestaciones Clínicas

El ADN es el blanco biológico más crítico, de hecho, una radiación de (2 gray) basta para originar centenares de lesiones en el ADN. [10] Las lesiones producidas por radiaciones de LET altas como protones y partículas alfa son menos reparables que las producidas por una radiación dispersa, como la radiación gamma y rayos X.

La radiación puede causar también daños en el número y la estructura de los cromosomas, cuya frecuencia aumenta con la dosis. Las aberraciones cromosómicas en linfocitos de sangre humana se han determinado con bastante exactitud, de manera que su frecuencia puede servir de dosímetro biológico útil. [11]

Las células maduras que no están en división son relativamente radioresistentes, pero las que se dividen dentro de un tejido son radiosensibles. La supervivencia de las células en división tiende a disminuir de forma exponencial con el aumento de la dosis, bastando con una dosis entre uno y dos gray para reducir la población superviviente en alrededor del 50%. Así, en órganos caracterizados por un recambio celular rápido, como la médula ósea la epidermis y la mucosa intestinal, el daño ocasionado será mayor.[12]

El conocimiento actual que se tiene de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes sobre el ser humano proviene de las explosiones nucleares de la segunda guerra mundial y de las catástrofes que han sucedido en reactores nucleares. También existe una observación directa de los pacientes irradiados con dosis relativamente altas. Sin embargo, los conocimientos sobre las consecuencias que puede acarrear la exposición a radiaciones bajas son más bien escasos y en su mayor parte, provienen de la extrapolación de resultados hechos con experimentación en laboratorios.

Algunos radionucleidos como el tritio, el carbono 14 y el cesio 137, tienden a distribuirse sistemáticamente y a irradiar la totalidad del cuerpo, mientras que otros radionucleidos tienen como característica que son captados por órganos específicos donde producen lesiones localizadas. Es el caso del radio y el estroncio 90 que se depositan sobre los huesos, por lo que lesionan primordialmente los tejidos propios del esqueleto, mientras que el yodo radiactivo se concentra en la glándula tiroides, localización principal de cualquier lesión resultante. [13][14]

La mayoría de los efectos sobre la salud por radiación exigen exposición a niveles elevados por lo que en principio cabría pensar que no hay apenas riesgos para los trabajadores ocupacionales de medicina nuclear ya que la radiación a la que están expuestos es más bien baja. No obstante, y como se observa en el estudio COMETA queda evidenciada una mayor fragmentación del ADN por parte de trabajadores expuestos a bajas dosis. [15]

### 3.1. Lesiones por Efectos Deterministas

En la Tabla 4 se describen las principales lesiones derivadas de efectos deterministas. [16]

ORGANO AFECTADO	EXPOSICION	EFFECTOS	BIBLIOGRAFIA
Piel	≥ 6 Sv ≥ 10-20 Sv	Eritema o enrojecimiento de la zona expuesta Ampollas, necrosis y ulceraciones	CIPR 1984
Médula Ósea y Tejido linfóide	2-3 Sv	Deterioro de respuesta inmunitaria en pocas horas Células hematopoyéticas de la médula ósea pueden sufrir depleción y causar granulocitopenia y trombocitopenia. A dosis mayores puede originarse hemorragia o infección mortal.	UNSCEAR 1988
Intestino	10 Sv	Denudación de las vellosidades intestinales suprayacentes que puede dar lugar a un síndrome fulminante causando la muerte.	CIPR1984 UNSCEAR 1988
Gónadas Masculinas	0,5 Sv 2 a 4 Sv	Espermatogonios pueden sufrir oligospermia Espermatogonios pueden sufrir esterilidad permanente	UNSCEAR 1988

#### IV. Efectos RI

Gónadas Femeninas	1 a 2 Sv > 2 Sv	Puede provocar esterilidad temporal Esterilidad permanente	
Aparato Respiratorio	6 a 10 Sv	En uno o dos meses puede producir neumonía y si se afecta a gran volumen de tejido pulmonar fibrosis pulmonar en meses o años	CIPR 1984 UNSCEAR 1988
Cristalino del Ojo	> 1 Sv	Formación de opacidad polar posterior microscópica	CIPR 1984
Embarazo-Útero	100-200 mGy	Al inicio embrionario se produce un error en la implantación o muerte no detectable del embrión. En el periodo de las dos primeras semanas no es probable que se den mal formaciones o muerte fetal. A partir de la tercera semana las malformaciones pueden darse en los órganos que se estén desarrollando en el momento de la exposición. Entre la 8ª y 25ª semana puede darse disminución medible del coeficiente intelectual CI y si la radiación es de 1 Gy retraso mental grave, siendo más crítico la primera mitad de este periodo.	CIPR 1984
Todo el Cuerpo	> 1 Sv	Síndrome de radiación agudo (SAR) con fase inicial prodrómica de malestar general, anorexia, náuseas y vómitos, seguida de un periodo latente, una segunda fase de enfermedad y por último la recuperación o la muerte.	CIPR 1984 UNSCEAR 1988
Localizada	> 1 Sv	Evolución lenta y pocos síntomas a no ser que el tejido y/ o la dosis sean relativamente grandes.	CIPR 1984 UNSCEAR 1988

Tabla 4: Lesiones Por Efectos Deterministas

### 3.2. Lesiones Por Efectos Estocásticos

#### 3.2.1. Efectos Cancerígenos

Los tumores inducidos por la RI no difieren de los que pueden surgir por otras causas por lo que no es fácil trazar una relación causa- efecto entre las dosis recibida de RI con un tumor, a no ser que dicho efecto sea evidente. De hecho, en poblaciones expuestas a niveles de radiación de fondo natural elevados no se ha podido comprobar un aumento de tasas de cáncer. [17] [18]

Cuando las células no pueden reparar el daño provocado por la radiación, éste puede derivar en un proceso canceroso. Los mecanismos de la carcinogénesis inducida por RI no están aún del todo claros, aunque las investigaciones apuntan a que pueden tener efectos iniciadores, promotores y efectos sobre la propia progresión de la neoplasia. También parece ser que pueden producir activación de oncogenes y la inactivación o supresión de genes supresores de tumores.

#### 3.2.2. Efectos Hereditarios

Debido al efecto de la RI las células germinales pueden sufrir una división de cromosomas incorrecta que puede dar como resultado una mutación en la descendencia.

El riesgo de que pueda transmitirse dicha mutación es mayor en mujeres expuestas que en varones, ya que las células reproductivas femeninas no son renovables.

Se puede considerar que cualquier alteración genética heredada es un efecto estocástico, aumentando por tanto la probabilidad si se aumenta la dosis y la frecuencia de exposición. No obstante, una exposición elevada de las gónadas por encima de los 3 a 4 Sv provoca la esterilidad permanente del individuo, anulando por tanto la posibilidad de producir herencia genética.

Debido a que el análisis de los efectos hereditarios de las radiaciones en humanos supone un tiempo aproximado de 40 años por generación observada, se hace necesaria la extrapolación de los datos obtenidos por experimentación con animales en laboratorio. [19]

### 3.2.3. Efectos Irradiación Prenatal

El feto es especialmente sensible a la RI, tiene menos células que el individuo adulto y éstas están en proceso de rápida división. Los daños que puede sufrir el feto por exposición a RI pueden ser tanto de tipo determinista como estocástico cuando las dosis son menores. Por todo ello la protección radiológica de las mujeres gestantes es de suma importancia y la ICRP ha elaborado una extensa guía sobre el embarazo y la radiación médica, donde se expone de manera detallada las consecuencias que sobre el feto puede suponer una exposición a radiaciones ionizantes. [20]





## V. MEDICINA NUCLEAR

La Medicina Nuclear es la especialidad médica que emplea los isótopos radiactivos, la radiación nuclear, las variaciones electromagnéticas de los componentes del núcleo atómico y técnicas biofísicas afines para la prevención, diagnóstico, terapéutica e investigación médicas. [21]

Incluye el estudio de los fenómenos biológicos originados por la utilización de los isótopos radiactivos, así como el empleo de ciclotrones y reactores nucleares en la producción de radionucleidos de uso médico, y la aplicación de sistemas de reconstrucción de imágenes y de elaboración de datos.

“A partir de la aparición de nuevas tecnologías, PET y SPECT, y la producción de nuevos radiofármacos, se posibilita el acceso al estudio de las funciones celulares, dando un renovado significado a la expresión ‘imagen molecular’”. [22]

Podemos considerar que la medicina nuclear puede dividirse en tres campos:

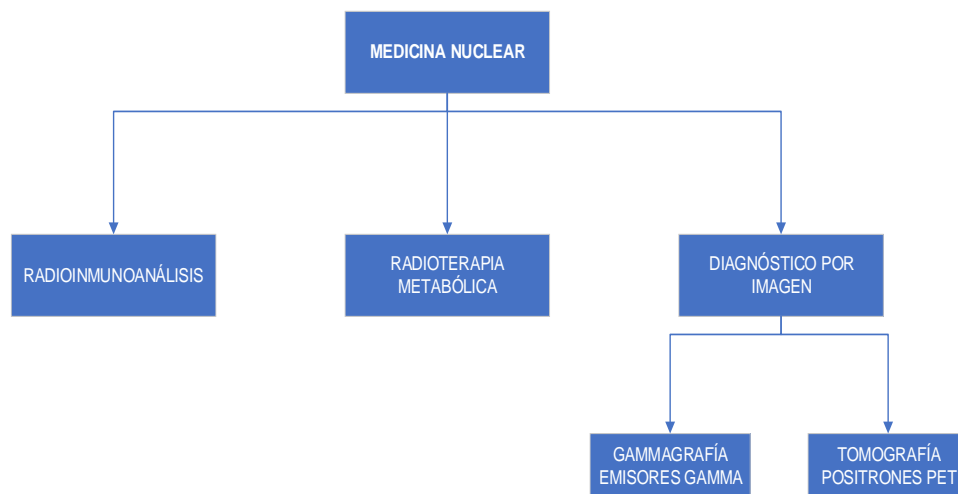


Figura 6: Campos en Medicina Nuclear

- 1- *Radioinmunoanálisis (RIA)*: Técnica de análisis *in vitro* que permite determinar la concentración de una sustancia en una muestra biológica.
- 2- *Radioterapia metabólica*: Utiliza radiaciones no encapsuladas que administradas por vía oral o parenteral se acumulan selectivamente en el órgano o lesión deseado, incorporándose a su ciclo metabólico. Se utilizan radionucleidos emisores de partículas  $\beta^-$ .

3- *Diagnosis por imágenes (gammagrafía)*: El radionucleido administrado al paciente emite radiación gamma. Una vez se ha fijado dicho radionucleido en el órgano diana, la radiación es detectada por la gammacámara, dando como resultado una imagen denominada gammagrafía, la cual puede ser:

- Planar (SPECT): Tomografía de emisión de fotón único.
- Tomográfica (PET): Tomografía de emisión de positrones.

## 1. Obtención de Radionucleidos

El origen de los radionucleidos utilizados en Medicina Nuclear es artificial siendo su modo de obtención más común la elución de un compuesto de molibdeno 99 ( $^{99}\text{Mo}$ ) generado en una central nuclear o la generación de los mismos mediante un acelerador de partículas.

### 1.1. Generadores de Radionucleidos

El generador de radionucleidos es un sistema que permite obtener un radionucleido de tiempo de semidecaimiento  $t_{1/2}$  corto, denominado hijo, a partir de la desintegración de otro radionucleido de  $t_{1/2}$  más largo, denominado padre.

Este es el caso del generador denominado  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , el más usado en los servicios de medicina nuclear de los hospitales. El  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  es un radionucleido emisor  $\gamma$  puro con una energía de 140 KeV y un  $t_{1/2}$  de 6,0 h.

El generador se coloca en un compartimento estéril donde se ubica una columna cromatográfica de pirex rellena de alúmina, con capacidad de absorción del  $^{99}\text{Mo}$ . El cuerpo del generador se encuentra aislado por un blindaje de plomo, lo que da protección a los técnicos del laboratorio frente a las RI de dichos radionucleidos.

La elución del generador se realiza mediante suero fisiológico que, al atravesar la columna de alúmina, no arrastra al  $^{99}\text{Mo}$  quedando éste unido a la alúmina. Sin embargo, la retención del tecnecio metaestable  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  es más débil y el suero es capaz de arrastrarlo, separándolo de esta manera del  $^{99}\text{Mo}$ .

Así pues, se obtiene una disolución estéril de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  en forma de pertecnetato de sodio, tal y como se indica en la Figura 7. El  $^{99}\text{Mo}$  decae por emisión de  $\beta^-$  en un 88 % de las desintegraciones hacia el  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , que a su vez se desintegra a  $^{99}\text{Tc}$  por transición isomérica, emitiendo radiación  $\gamma$ . Este  $^{99}\text{Tc}$  es también radiactivo, pues se desintegra emitiendo radiación  $\beta^-$  y con un prolongado periodo de desintegración, pero es totalmente inocuo para el paciente porque tiene un bajo nivel energético de radiación  $\beta^-$ .

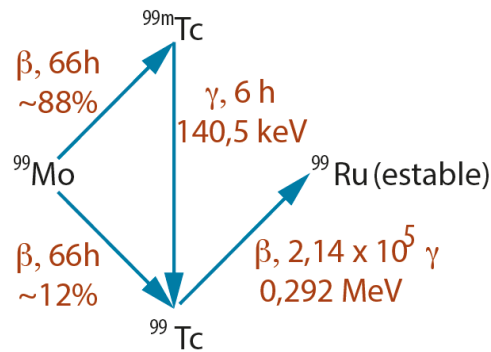


Figura 7: esquema obtención del  $^{99m}\text{Tc}$

Una vez obtenido el  $^{99m}\text{Tc}$  éste puede ser utilizado en la elaboración de diferentes radiofármacos mediante procesos de marcaje que se citan más adelante. Esta operación se realiza en la Gammateca, donde también es almacenado el  $^{99}\text{Mo}$ .

### 1.2. Ciclotrón

Se trata de un acelerador de partículas que permite bombardear el elemento blanco con partículas subatómicas cargadas para generar radionucleidos. Dichas partículas proyectil son protones, deuterones y partículas  $\alpha$ . Éstas deben ser aceleradas lo que se consigue gracias a la energía cinética que proporciona el Ciclotrón. Para ello el acelerador consta de dos electrodos huecos semicirculares denominados DES, los cuales se encuentran bajo el efecto de un campo magnético. En el centro se sitúa la fuente de la partícula que se desea acelerar, que siguiendo una trayectoria en espiral impacta contra el blanco, generando así los radionucleidos necesarios.

El Ciclotrón se encuentra aislado por una estructura con paredes de hormigón de 2 m de anchura, protegiendo así a los técnicos del laboratorio de la radiación emitida por los radionucleidos obtenidos.

## 2. Obtención de Radiofármacos

“Un *radiofármaco* es un compuesto radiactivo utilizado para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades”, [23] es decir, cualquier producto que una vez preparado para su uso con finalidad terapéutica o diagnóstica contenga uno o más radionucleidos (isótopos radioactivos).

Son empleados tanto con un propósito *diagnóstico*, su uso más frecuente, aprovechando la propiedad emisora de los radioisótopos para su detección, como con propósitos *terapéuticos*, aprovechando el efecto deletéreo que la radiación puede tener sobre un tejido:

- *Propósitos diagnósticos y marcadores:* los isótopos se fijan a las células de los órganos donde emiten radiación. Se obtienen imágenes de tejidos, por ejemplo en operaciones de extirpación de tumores localizando los tejidos a extirpar. Según su forma de incorporación al organismo, pueden ser:
  - *Encapsulados:* El material radiactivo está inserto dentro de un cápsula inactiva, que en el interior del organismo se deshace y libera la radiación.
  - *Inyectados:* El isótopo radiactivo se inyecta directamente en el paciente.
- *Terapéuticos:* se utilizan para terapia de tumores, pueden ser inyectados o encapsulados.

La preparación de un radiofármaco, tanto si su uso es para tratamiento como para la obtención de imágenes, requiere una asociación entre dos componentes: un radionucleido y una molécula que funciona como “vehículo” que se encuentra en el llamado Kit Frio. Esta molécula dirige al radiofármaco selectivamente a un tejido específico en respuesta a condiciones fisiológicas o patrones de expresión genética específicos.

*El Kit Frio* viene preparado por la industria farmacéutica. Se trata de un componente no radiactivo que suele presentarse en cápsula de aluminio cerrada con tapa de goma. Su composición genérica es la siguiente:

- La molécula a marcar, que depende del órgano diana
- Un agente reductor (cloruro de estaño) necesario para reducir el  $^{99m}\text{Tc}$  eluido como pertecnetato de sodio, aumentar su reactividad química y permitir el marcaje dado que el pertecnetato de sodio ( $^{99m}\text{TcO}_4^-$ ) es muy estable y por tanto inútil para el marcaje.
- Estabilizadores, que eviten la degradación del preparado

Se denomina *marcaje* al proceso por el cual tecnecio radiactivo es fijado a la molécula del Kit Frio. Como resultado del marcaje se obtiene el *radiofármaco*, el cual, además de los requisitos propios de cualquier fármaco, deberá tener las siguientes características en función del radionucleido seleccionado:

- Tiempo de semidecaimiento corto

- Desintegración por captura electrónica, por transición isomérica o por emisión positrónica
- Emisión de energía del orden de 150 Kev.

### **3. Vías de Administración del Radiofármaco**

Es importante conocer los diferentes métodos de administración del radiofármaco al paciente ya que, en función de ello, el personal de Medicina Nuclear puede verse expuesto a diferentes riesgos.

#### *Administración Oral:*

El radiofármaco se administra en cápsulas de gelatina que al disolverse en el estómago liberan el trazador. Con este procedimiento no hay riesgo de contaminación por parte del personal sanitario, pero sí de radiación si el radiofármaco emite radiación gamma, por lo que éste debe permanecer debidamente protegido hasta el momento de su administración.

#### *Administración Parenteral:*

Se suministra mediante vía intravenosa. El vial debe estar protegido por una cápsula de plomo para proteger de la radiación al personal sanitario. Se debe prestar especial atención a la retirada del material utilizado, existiendo riesgo de contaminación y radiación. Pueden comprarse preparados o ser preparados en radiofarmacia en mampara protegida por vidrio plomado.

#### *Administración Inhalatoria:*

Se emplea en estudios de ventilación pulmonar, entre otros, y es tal vez la que más riesgo implica tanto de radiación como de contaminación, debido a la volatilidad del radiofármaco, pudiendo dejar la atmósfera circundante contaminada de RI.

#### *Administración Intratecal:*

Al igual que la parenteral se trata de un vial inyectable, el cual debe estar protegido mediante cápsula de plomo, y es suministrado al paciente mediante punción lumbar en el espacio subaracnoideo. Existe riesgo de radiación y contaminación.

#### *Administración Subdérmica o Intradérmica:*

Se utiliza en la búsqueda del ganglio centinela y se administra mediante vial inyectable, el cual debe estar protegido en todo momento mediante encapsulado de plomo. Los riesgos son de contaminación y radiación.

#### 4. Radionucleidos Utilizados

La elección del radionucleido empleado se realizará en función de la aplicación o información que se desea obtener, la energía de emisión, el periodo de semidesintegración y otros factores que se deben tener en cuenta para que la dosis absorbida por el paciente sea mínima y su eliminación sea rápida. Existen numerosos radionucleidos que se utilizan en medicina nuclear. Los más habituales son los siguientes:

1. Flúor-18 ( $^{18}\text{F}$ ):

Emisor de positrones, útil para realizar Tomografías de Emisión de Positrones (PET en inglés); se administra normalmente mediante inyección.

2. Galio-67 ( $^{67}\text{Ga}$ ):

Emisor de rayos gamma, utilizado como marcador en infecciones e inflamaciones y en neoplasias hematológicas (leucemias y linfomas). Se administra mediante inyección y su tiempo de decaimiento es de 78 horas.

3. Indio-111 ( $^{111}\text{In}$ ):

Emisor de radiaciones gamma, utilizado como un marcador de anticuerpos, de componentes celulares de la sangre, de plaquetas para detectar trombos, de leucocitos para detectar inflamaciones y abscesos, de péptidos y proteínas para descubrir su afectación en cánceres raros. Se administra mediante inyección y su tiempo de decaimiento es de 8 minutos.

4. Samario-153 ( $^{153}\text{Sm}$ ):

Emisor de radiaciones gamma y beta, utilizado para aliviar los dolores de huesos producidos en las metástasis o en pacientes terminales de cáncer. Se administra mediante inyección y posee una vida media de 2 días.

5. Tecnecio-99 metaestable ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ):

Se obtiene a partir del Molibdeno-99. Es emisor de rayos gamma y es el más utilizado en medicina nuclear (80%). Se usa como marcador radiactivo para estudios funcionales de la glándula tiroidea, el miocardio, el hígado, los riñones, el cerebro, la sangre, la vesícula biliar, los pulmones, el esqueleto y la detección de tumores. Se administra mediante inyección, su periodo de semidesintegración es de 6h.

6. Yodo-131 ( $^{131}\text{I}$ ):

Es emisor de rayos gamma (10% y utilizado para imagenología) y rayos beta (90% que solo destruye tejidos y no aporta nada a la imagen). Se usa para marcar la glándula tiroidea; Se administra por vía oral y su periodo de semidesintegración es de 8 días.

7. Yodo-123( $^{123}\text{I}$ ):

Emite rayos gamma sin emitir rayos beta dañinos. Es empleado en el diagnóstico de glándulas tiroideas. Se puede administrar tanto vía inyección como por medio de cápsulas o en forma de bebida; su periodo de semidesintegración de 13 horas.

8. Ytrio-90 ( $^{90}\text{Y}$ ):

Emite radiación beta, por lo que presenta riesgo de irradiación, y riesgo de contaminación al ser un material muy volátil. Se utiliza como esferas marcadas con Ytrio para el control del cáncer hepático por inyección vía catéter. Su periodo de semidesintegración es de 64,1 horas.

## 5. Riesgos Específicos: Irradiación, Contaminación

Los trabajadores en Medicina Nuclear están sometidos a unos riesgos específicos derivados del uso de material radiactivo.

Existe *riesgo de irradiación externa* cuando, por la naturaleza de la radiación y el tipo de práctica, la persona sólo está expuesta mientras la fuente de radiación está activa y no puede existir contacto directo con un material radiactivo. [24]

Existe *riesgo de contaminación radiactiva* cuando el organismo entra en contacto con la sustancia radiactiva debido a la presencia no deseada de material radiactivo en una materia, superficie, medio o persona. Dicho material radiactivo puede penetrar en el organismo por cualquier vía (respiratoria, dérmica, digestiva o parenteral), por medio de derrames durante la administración del isótopo, daños en el contenedor de la fuente o a través de fluidos corporales del paciente como orina, vómitos y saliva. Las normas de higiene hospitalarias están pensadas para adecuarse a cada situación y evitar estos posibles accidentes. La contaminación puede ser mucho más grave que la simple irradiación, ya que la persona sigue estando expuesta a la radiación hasta que se eliminan los radionucleidos por metabolismo o decaiga la actividad radiactiva de los mismos.

Existe un caso particular donde se puede producir contaminación radioactiva a través del aire, si el isótopo radioactivo se encuentra en estado gaseoso y el paciente lo inhala por las vías respiratorias, si se emplea un aerosol, o cuando se emplea un vial con  $^{131}\text{I}$  que es extremadamente volátil.





## **VI. MEDIDAS PREVENTIVAS PROFESIONALES EN MEDICINA NUCLEAR**

La protección frente a las radiaciones nucleares, tanto de trabajadores como de pacientes tiene su apoyo en tres principios fundamentales, tal y como se expresa en el capítulo 5.6 de la publicación 103 de la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica)

1. Principio de Justificación
2. Principio de Optimización (ALARA)
3. Principio de Límite de Dosis. [25]

Las medidas expresadas por los diferentes organismos internacionales y normativa aplicable en el Estado y que se recogen en este capítulo, vienen reflejadas de manera sintética en la guía elaborada por el Servicio Navarro de Salud. [26]

### **1. Justificación de Uso de RI Según Organismos Internacionales y CSN**

El *principio de justificación* implica que cualquier decisión que altere la situación de exposición a radiación debería producir más beneficio que daño, tal y como se recoge y matiza en la normativa estatal del RD 815/2001 “*sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas*”.

De este modo, cuando se introducen nuevas actividades que impliquen el uso de RI es necesario hacer una planificación previa y tomar las acciones necesarias sobre la fuente de las RI. En este caso la aplicación del principio indica que nunca se debe planificar una exposición cuando los daños causados por la radiación sean mayores que los beneficios ocasionados por la misma.

Cuando no existe control directo sobre la fuente de RI, y solo se puede actuar sobre la forma de exposición como ocurre en situaciones de emergencia y en exposición inevitable, la aplicación del principio de justificación recae sobre las elecciones a realizar para evitar una exposición prolongada innecesaria, minimizándola al máximo posible.

En cualquier caso, es indudable que el uso de RI en medicina ofrece una serie de beneficios en cuanto a información extremadamente útil y necesaria para el diagnóstico así como tratamientos terapéuticos. Durante décadas se han utilizado RI en medicina nuclear para diagnóstico con dosis mínimas y no se han encontrado efectos adversos a

largo plazo, aunque su uso no está exento de riesgos. En muy raras ocasiones se han llegado a presentar reacciones alérgicas a los radiofármacos, pero suelen ser de reacciones suaves que no revisten gravedad. En lo que a tratamientos terapéuticos se refiere, siempre hay que evaluar los riesgos frente a los beneficios obtenidos y esta información se da a conocer previamente al paciente. [27]

## **2. Criterio ALARA**

El término ALARA (“As Low As Reasonably Achievable”) se recoge por primera vez en 1973 en la publicación 22 de ICRP ante la imposibilidad de establecer valores umbrales por debajo de los cuales se garantice que no se producen daños en las células que a su vez deriven en procesos cancerosos. [28].

El propósito de este criterio o filosofía ALARA es mantener cualquier exposición a radiaciones ionizantes en un nivel "tan bajo como razonablemente sea alcanzable", dependiendo de los factores socio-económicos del entorno donde se desarrolla la actividad y corresponde a uno de los principios básicos de cualquier medida de seguridad radiológica. [29]

El valor ALARA puede tener equivalencia con la economía de la prevención: Corresponde al nivel de dosis equivalente del conjunto de personas expuestas, por debajo del cual, el coste de cualquier medida adicional de protección radiológica sería mayor que el valor de la reducción del detrimento para la salud que con ella conseguirá.

La filosofía ALARA también hace referencia a la política de calidad que debe seguirse en la realización de radiodiagnóstico y tratamientos con RI, ya que para garantizar una mínima actividad radiológica en la obtención de los resultados deseados es preciso incidir en la eficacia y eficiencia de los procesos intervinientes.

De esta manera, según el artículo 2 del RD 1976/1999, las unidades de radiodiagnóstico están obligadas a utilizar un Programa de Garantía de Calidad para controlar las dosis recibidas así como a los trabajadores expuestos y a la población que pueda entrar en exposición. Del mismo modo, el RD 1841/ 1997 de 5 de diciembre, “por el que se establecen los criterios de calidad en medicina nuclear” está enfocado en garantizar que la dosis suministrada a los pacientes será la mínima posible para alcanzar los resultados deseados.

Según los condicionantes de desarrollo tecnológico se puede deducir que los tres factores básicos independientes para reducir la exposición a las RI por parte del personal

de Medicina Nuclear son: Distancia, blindaje y tiempo; esto es distancia mayor, menor tiempo de exposición y la creación de barreras, disminuyen la irradiación

La gestión para garantizar la optimización de la exposición a RI debe expresarse en un programa de optimización o ALARA, que puede verse sometido a una auditoría externa por parte del CSN (Art. 2ª de la Ley 15/1980). Dicho programa debe constar de: [29]

1. Declaración de políticas
2. Responsabilidades
3. Papel del grupo ALARA
4. Participación de los trabajadores
5. Entrenamiento
6. Revisión ALARA de procedimientos
7. Sugerencias ALARA
8. Contabilidad de la exposición y análisis para la reducción de la exposición.
9. Planeación ALARA de trabajos:
  - Planeación ALARA previa al trabajo
  - Seguimiento ALARA de trabajos

### 3. Límite de Dosis y Tipo de Trabajadores

Los límites de dosis vienen expresados en norma por el RD 783/ 2001, donde se recogen las recomendaciones de límite de dosis de la publicación 103 ICRP. Según dichas recomendaciones, además de los límites establecidos en el RD se expresa que para garantizar un valor límite de 100 mSv/ 5 años, se recomienda un límite de dosis de 20 mSv/año promediando sobre periodos definidos de 5 años. [25]

Para estos trabajadores, el RD 783/2001 establece los siguientes límites de radiación acumulada:

ORGANO	LIMITE DE DOSIS	PERIODO
Todo el cuerpo	100 mSv 50 mSv	Durante todo el periodo de 5 años oficiales consecutivos Dosis efectiva máxima en cualquier año oficial
Cristalino del Ojo	150 mSv	Dosis equivalente por año oficial
Piel	500 mSv	Dosis equivalente promediada sobre cualquier superficie de 1 cm <sup>2</sup> por año oficial

Manos	500 mSv	Dosis equivalente por año oficial
Antebrazos		
Pies		
tobillos		

Tabla 5: límite de dosis RD 783/ 2001

El RD 783/2001, aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. Este Reglamento tiene por objeto establecer las normas relativas a la protección de los trabajadores y de los miembros del público contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes, de acuerdo con la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre Energía Nuclear. El artículo 20 de este RD clasifica los trabajadores expuestos en dos grupos:

- *Categoría A:* Engloba a los trabajadores que “puedan recibir una dosis efectiva superior a 6 mSv por año oficial o una dosis equivalente superior a 3/10 de los límites de dosis equivalente para el cristalino, la piel y las extremidades” según se establece en el apartado 2 del artículo 9.
- *Categoría B:* Engloba a todos aquellos trabajadores a los que “es muy improbable que reciban dosis superiores a 6 mSv por año oficial o a 3/10 de los límites de dosis equivalente para el cristalino, la piel y las extremidades” según se establece en el apartado 2 del artículo 9.

El Manual de Protección Radiológica de la Sociedad Española de Protección Radiológica y del Ministerio de Sanidad simplifica aún más esta clasificación: “Como orientación se pueden considerar de categoría A las personas que trabajan próximas al haz de rayos X en Radiología intervencionista, vascular y cardiaca, los que administran y preparan dosis radiactivas en Medicina Nuclear, las asociadas con la preparación del tratamiento y el cuidado de pacientes en terapia metabólica, así como los que realizan estas funciones en Braquiterapia.” Así, todos los trabajadores expuestos a RI en medicina nuclear serán considerados de Categoría A. [30]

A pesar de que los niveles de exposición del personal de Medicina Nuclear son relativamente bajos, la exposición no puede ser completamente eliminada o rebajada a niveles iguales a los de las radiaciones naturales o de fondo, por lo que se hace necesario un seguimiento del estado de salud de dichos trabajadores en relación a su exposición acumulada a las RI. Se podría decir que se trata de una medida de protección reactiva y

que exige de su propio protocolo, siendo fundamental una detección precoz de las patologías derivadas de una exposición prolongada a bajas dosis.

#### **4. Instalaciones. Clasificación y Delimitación de Zonas**

El RD 783/2001 sobre protección sanitaria a radiaciones ionizantes, en sus artículos 16, 17 y 18 clasifica las zonas de posible exposición según su riesgo de radiación. Se especifica detalladamente que las zonas tendrán que estar delimitadas adecuadamente y señalizadas de tal manera que quede visible el riesgo de exposición que existe, tal y como se muestra en la Tabla 6. Además se limitará el acceso a dichas zonas a trabajadores autorizados y que hayan recibido formación e información adecuada, relacionada con instrucciones sobre los procedimientos de trabajo.

Las zonas de exposición se clasifican de la siguiente manera:

- *Zona controlada*

Las zonas controladas incluyen todas aquellas que reúnan alguno de los siguientes requisitos:

- Existe la posibilidad de recibir más de 6 mSv/año a cuerpo completo.
- Existe la posibilidad de recibir más de 3/10 de los límites para cristalino, piel y extremidades.
- Aquellas en las que sea necesario seguir procedimientos de trabajo especiales para reducir la exposición a radiaciones ionizantes.

En estas localizaciones el uso de dosímetros es obligatorio. En caso de existir riesgo de contaminación será obligatorio el uso de EPIs y la colocación de detectores para detectar la posible contaminación de personas y equipos, y actuar tomando las medidas necesarias.

Además, dependiendo del tipo de exposición al que se somete el trabajador, la zona controlada a su vez se subdivide en:

- *Zona de permanencia limitada:* Existe el riesgo de recibir una dosis superior a los límites.
- *Zona de permanencia reglamentada:* Existe el riesgo de recibir una dosis superior a los límites en un corto periodo de tiempo.
- *Zona de acceso prohibido:* Existe el riesgo de recibir una dosis superior a los límites con una sola exposición.

- *Zona vigilada*

Son todas aquellas zonas de trabajo que, sin llegar a ser zona controlada, cumplen alguna de las siguientes condiciones:

- Existe la posibilidad de recibir más de 1 mSv/año
- Existe la posibilidad de recibir una dosis superior a 1/10 de los límites para cristalino, piel y extremidades

Dependiendo del origen del riesgo radiológico y de su importancia, en las zonas controladas y vigiladas será necesario realizar una vigilancia radiológica del ambiente de trabajo y se debe efectuar una comprobación por medio de un dosímetro aéreo para tener una estimación de las dosis que pueden recibirse.











Pictograma con Rayos:  
*Riesgo de Radiación Ionizante*



Pictograma con Puntos:  
*Riesgo de Contaminación Radiactiva*



Pictograma con Rayos y Puntos:  
*Riesgo de Radiación y Contaminación*

ZONAS	LIMITE DE DOSIS	REQUISITOS
<b>VIGILADA</b>	<p>&gt; 1 mSv/ o &gt; 1/ 10 límites cristalino, piel y extremidades</p>	<p>Vigilancia radiológica del ambiente de trabajo: <b>Dosímetro Aéreo</b></p>
	   	
<b>CONTROLADA</b>	<p>&gt; 6 mSv/ o &gt; 3/ 10 límites cristalino, piel y extremidades</p>	<p>Uso de Dosímetros obligatorio Uso de EPIs obligatorio Detectores de contaminación</p>
	   	













Permanencia Limitada	Dosis anual > límite de dosis trabajador expuesto				
Permanencia Reglamentada	Dosis periodo corto de tiempo > límite de dosis trabajador expuesto				
Acceso Prohibido	Dosis única exposición > límite de dosis trabajador expuesto				

Tabla 6: señalítica y zonas de riesgo radiológico RD 783/ 2001

## 5. Normas Generales de Seguridad

El RD 783/2001 establece una serie de normas generales de seguridad de obligado cumplimiento en las zonas vigiladas y controladas:

- Queda estrictamente prohibido fumar, comer beber y maquillarse en la zona de trabajo de medicina nuclear.
- Los trabajadores deberán estar protegidos con un equipo adecuado al riesgo al que están expuestos, en concreto aquellos que tengan que tratar con los isótopos radioactivos directamente.
- Durante la manipulación de los isótopos y la manipulación y preparación de las dosis de inyección, los trabajadores expuestos deberán llevar delantales, guantes y collares tiroideos de plomo de un espesor de 5 mm.
- En el caso de manipulación de material tanto irradiado como susceptible de estar irradiado, se deben utilizar guantes dobles y cambiarlos frecuentemente.
- Se recomienda no introducir objetos personales en el área de manipulación de productos radiactivos
- Las secciones que se considere han de estar protegidas de la radiación directa deben estar separadas por medio de mamparas móviles de plomo.

- Las jeringuillas para administración del isótopo radioactivo serán plomadas para contener emisiones de radiación hasta la inyección en el paciente.
- La ropa de laboratorio no debe abandonar la zona de trabajo. Para proteger las superficies se deberá usar bandejas antiderrames y se dispondrá de superficies impermeables o al menos recubiertas de papel absorbente.
- Es obligatorio el uso de dosímetros personales de cuerpo durante toda la jornada laboral de todos los trabajadores de Medicina Nuclear, y de anillo para aquellos que realicen actividades de dosificación y marcaje de radiofármacos, así como administración de los mismos a paciente; en el punto 6.8 se detallan las normas en el uso de los dosímetros personales.

## **6. Protección Personal Especialmente Sensible; Embarazadas**

En el Artículo 10 del RD 783/2001 se trata sobre la protección especial durante el embarazo y la lactancia.

De manera general, todas aquellas mujeres que se encuentren embarazadas tendrán prohibido realizar cualquier trabajo que implique un riesgo intolerable para sí mismas y para el feto. El límite de dosis que se aplicará al feto será de 1 mSv, el cual se considera similar a una dosis de 2 mSv en el abdomen.

Habitualmente es el personal de enfermería el que está sometido a estas normas por estar en contacto directo con las fuentes de radiación, mientras que en el caso de médicos embarazadas, al no estar en contacto constante con las fuentes de radiación, no será necesario normalmente seguir estas instrucciones.

Como recomendación general, se procurará evitar que la mujer gestante o en periodo de lactancia trabaje con material radiactivo, aunque, en cualquier caso, las mujeres embarazadas, sí que pueden realizar trabajos compatibles con su situación, siempre y cuando se encuentren en una situación de seguridad con respecto a las radiaciones de acuerdo con la legislación.

## **7. Dosimetría**

La Dosimetría de las radiaciones ionizantes es la rama de la ciencia que se ocupa de la medida de la dosis absorbida por un material o tejido como consecuencia de su exposición a las radiaciones ionizantes presentes en una zona de radiación. Según el método empleado para conseguir este objetivo podemos distinguir entre: Dosimetría Ambiental y de Área, y Dosimetría Personal



La radiación se puede medir empleando detectores o dosímetros personales:

- **Detectores:** Se utilizan para el monitoreo ambiental o de área.
  - Detectores de radiación: Como los contadores Geiger. Normalmente miden la dosis equivalente ambiental.
  - Detector de contaminación: Como los contadores de centelleo. Mide las cuentas o impulsos por segundo (CPS).
- **Dosímetros Personales.** Son dispositivos que miden periódicamente las dosis acumuladas por cada individuo durante su trabajo. Los dosímetros personales deben ser de tamaño reducido para poder ser portados con comodidad durante el trabajo. Los más comúnmente empleados en Dosimetría Personal son los basados en detectores termoluminiscentes (TLDs) y en películas fotográficas. Existen dosímetros específicos de la zona donde se colocan, como de abdomen, muñecas, anillos o de áreas en general, para utilizarlos tanto en la zona corporal que quede expuesta a la radiación, como detrás de elementos de protección como delantales, guantes etc.

Con respecto a la normativa aplicable a la “Vigilancia individual”, el artículo 7 del RD 783/ 2001, establece:

1. Las dosis recibidas por los trabajadores expuestos deberán determinarse de acuerdo con lo establecido en los artículos 28 y 29 cuando las condiciones de trabajo sean normales, con una periodicidad no superior a un mes, para la dosimetría externa, y con la periodicidad que en cada caso se establezca para la dosimetría interna, de aquellos trabajadores que están expuestos a riesgo de incorporación de radionucleidos.

2. La dosimetría individual, tanto externa como interna, será efectuada por los Servicios de Dosimetría Personal expresamente autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

3. El titular de la práctica o, en su caso, la empresa externa transmitirá los resultados de los controles dosimétricos al Servicio de Prevención que desarrolle la función de vigilancia y control de la salud de los trabajadores, a quien corresponderá interpretarlos desde el punto de vista sanitario. En caso de urgencia, dicha transmisión deberá ser inmediata.

Teniendo en cuenta que los trabajadores de Medicina nuclear se clasifican como trabajadores de Categoría A, el RD 783/2001 establece que dichos trabajadores están obligados a la utilización de dosímetros externos individuales que midan la dosis externa representativa de la totalidad del organismo, durante toda la jornada laboral si tienen riesgo de exposición externa y la de dosímetros adecuados en partes especialmente afectadas si tienen riesgo de exposición parcial.

Es obligatorio el registro de las dosis recibidas durante toda la vida laboral del trabajador en un historial dosimétrico individual actualizado y a disposición en todo momento del trabajador, de acuerdo con el artículo 38 del RD 783/ 2001 que especifica que debe mantenerse el archivo de los resultados hasta que el trabajador haya cumplido los 75 años y un mínimo de tiempo, en cualquier caso no inferior a 30 años. El contenido de dicho historial en caso de trabajadores de Categoría A es el registro de las dosis mensuales, las dosis acumuladas en cada año oficial y las dosis acumuladas en cada periodo de cinco años acumulados consecutivos.

## **8. Establecimiento de Protocolos**

Hasta ahora se han visto las medidas y actuaciones que van encaminadas a la protección del personal de medicina nuclear frente a las RI dentro del desarrollo habitual de sus funciones diarias. Podría decirse que se trata de una protección activa para minimizar la exposición o bien impedirla.

Además, se han de establecer protocolos específicos que garanticen el cumplimiento de las medidas de seguridad así como la efectividad de las mismas.

En primer lugar, se ha de establecer un *protocolo de vigilancia sanitaria específica* que garantice que la radiación a la que se ven sometidos los trabajadores de Medicina Nuclear en el desempeño de sus labores que se encuentran por debajo de los umbrales que establece como límites el RD 783/ 2001, no repercute de forma negativa en su salud.

Además, se establece un *plan de emergencias* para el caso de que se produzca una emergencia sobrevenida y que se evite riesgos o los minimice en la medida de lo posible.

### **8.1. Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica**

Como se ha comentado en puntos anteriores, no existe un umbral por debajo del cual las radiaciones ionizantes no revistan riesgos para la salud humana. Por lo tanto, aunque se limite la dosis a la que pueden verse sometidos los trabajadores a niveles muy

por debajo de los límites umbral frente a riesgos deterministas, no hay garantías de que no se produzcan efectos estocásticos.

La Comisión de Salud Pública del Consejo Interterritorial del Sistema Nacional de Salud, donde ha participado entre otros, el organismo público Instituto Navarro de Seguridad Laboral, actual Instituto de Salud Pública y Laboral de Navarra (ISPLN), ha desarrollado los Protocolos de Vigilancia Sanitaria Específica donde se recogen a tal efecto, las exigencias expresadas en el marco normativo de aplicación.

De esta manera, teniendo en cuenta la Ley de Prevención de Riesgos Laborales 31/ 1995 de 8 de noviembre, los reconocimientos médicos a realizar a los trabajadores deben ser específicos con respecto a los factores de riesgo a los que esté expuesto el trabajador, y en cuanto a los riesgos derivados de las RI, debe cumplirse con lo establecido en el Reglamento de Protección Sanitaria contra RI que emana del RD 783/ 2001.

Las condiciones de estos controles sanitarios quedan recogidas en el RD 39/ 1997 Reglamento de los Servicios de Prevención, en su artículo 37 que en su punto 4 “Protocolo de Vigilancia Sanitaria Específica” detalla la información que debe contener la Vigilancia Sanitaria:

- Historial Laboral
- Historia Clínica
- Control Biológico y estudios complementarios
- Criterios de Valoración

En su Anexo C se describe de una manera esquemática el procedimiento a seguir en un protocolo sanitario, que se incluye en este trabajo a modo de ejemplo.

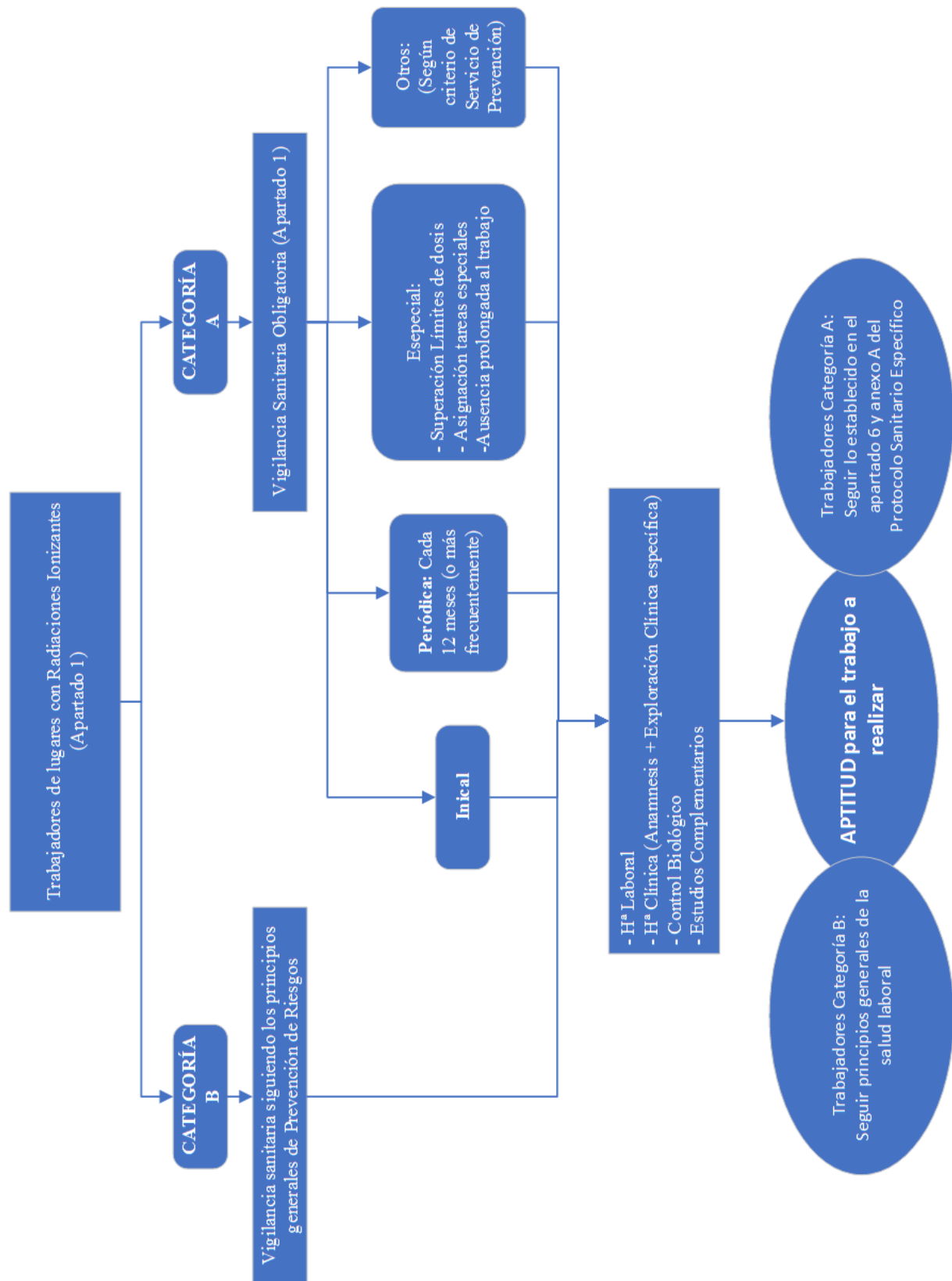


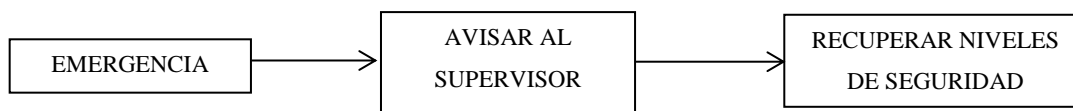
Figura 8: Esquema del Protocolo de Vigilancia Sanitaria [31]

### 8.2. Plan de Emergencia

Ante situaciones potenciales de emergencia debe establecerse un protocolo de actuación que garantice la máxima seguridad frente a los riesgos derivados de las RI en tales circunstancias.

La línea de mando para la gestión de situaciones de emergencia sigue el siguiente orden: Supervisor responsable, Supervisor, y Operador.

El proceso de intervención ante una emergencia seguirá este esquema:



El Plan de Emergencia define las medidas a tomar en situaciones de emergencia previsible y los procesos de registro de información y documentación para el organismo regulador. Dichos supuestos serían

- Contaminación
- Ingestión
- Incendio/inundación
- Pérdida o robo de fuentes

#### **Contaminación**

Una superficie está contaminada si la actividad específica por unidad de superficie es superior a  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ , para fuentes gamma y beta. A efectos prácticos, se considera que una superficie está contaminada si su lectura es superior a la del fondo radiactivo de la zona con el detector empleado.

$$\text{Lectura} > 0,4 \text{ Bq/cm}^2 (\beta \text{ y } \gamma)$$

En el caso de que la contaminación se haya producido en personas, para descontaminar se debe lavar con agua tibia y jabón de pH neutro, sin extender la contaminación ni erosionar la piel y evitando la entrada de agua por orificios.

En el supuesto de una *contaminación de bienes* se precisa descontaminar siempre que sea posible. En caso de que no lo fuere se debe señalar el bien y esperar a que la contaminación decaiga. La descontaminación debe realizarse siempre mediante

movimientos circulares de fuera hacia dentro, en espiral, para evitar la dispersión de la contaminación.

### **Incendio o inundación**

En el caso de que se produjese un incendio o una inundación, se deberían adoptar las siguientes medidas:

- No actuar aisladamente y pedir ayuda
- Dar aviso al Supervisor Responsable y al Servicio Público contra Incendios
- Informar al personal de primera actuación de la naturaleza del material
- Cerrar el paso a toda persona ajena a la extinción de incendios
- Evitar que el fuego/ inundación se propague
- Si el fuego/ inundación amenaza al material radiactivo, evacuarlo a un lugar seguro y bajo llave, siempre que sea posible
- Ante un posible incendio que pueda afectar a material radiactivo, si es posible, retirar a un lugar seguro, y en este orden:
  - Generadores  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$
  - Cápsulas de  $^{131}\text{I}$ , dado que la volatilidad de estos radionucleidos implica mayores dosis comprometidas por inhalación

### **Robo o pérdida de la fuente**

En el caso de que se produjese un robo o pérdida de la fuente, se deberían adoptar las siguientes medidas:

- Dar aviso al Supervisor Responsable y a todo el personal de la instalación
- Asegurarse de que la fuente no está en la instalación
- El Supervisor Responsable se encargará de la difusión adecuada del suceso
- Cuando se curse la denuncia, se darán las instrucciones necesarias para la adecuada manipulación en el momento de su recuperación

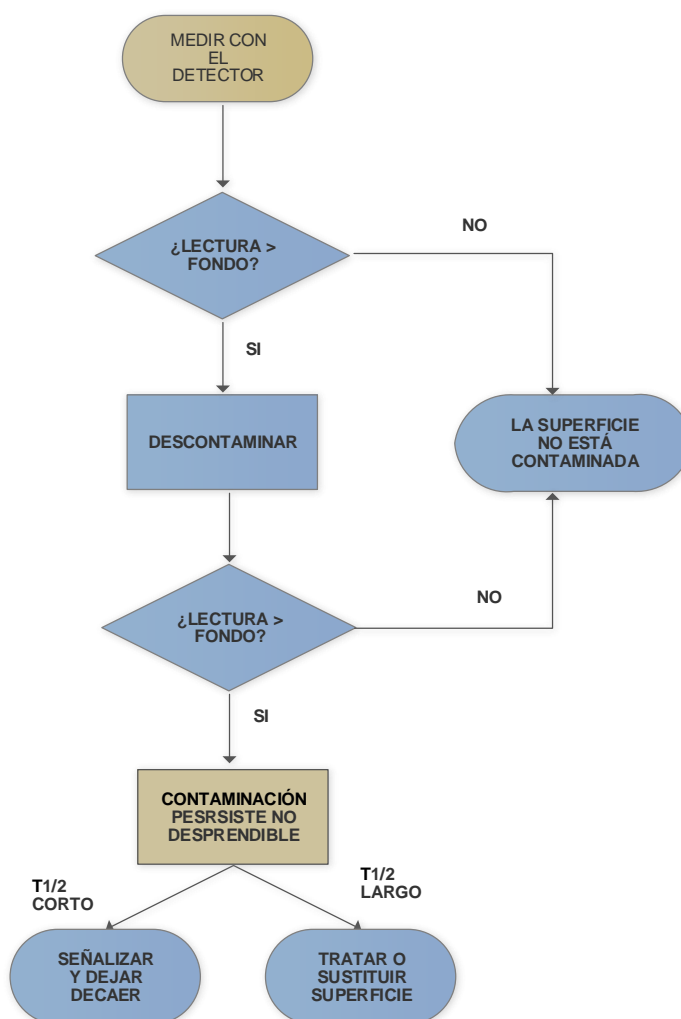


Figura 9: Esquema de actuación frente a contaminación de superficies





## **VII. RESIDUOS RADIATIVOS**

El concepto de residuo radiactivo está definido en el artículo 2.9 de la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear (LEN) como sigue: "Residuo radiactivo es cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)".

Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), los residuos radiactivos hospitalarios pueden considerarse como residuos líquidos o sólidos de baja y media actividad. Atendiendo a ello, se hace una clasificación de los mismos en Residuos Radiactivos Líquidos y Residuos Radiactivos Sólidos.

En el RD 783/2001 la protección frente a los Residuos Radiactivos que se puedan generar en una instalación radiactiva va encaminada a la protección del medio ambiente y del público, según lo expresado en los artículos 49 a 57 de dicho RD.

En el artículo 56 se establecen las características que debe cumplir el almacenamiento de residuos indicando que los recipientes deben ser adecuados para la protección frente a las RI, teniendo en cuenta las condiciones del lugar de almacenamiento y posible dispersión del material radiactivo.

También en este punto se hace referencia al correcto etiquetado identificativo y a la elaboración de un registro donde se recogerán los siguientes datos consignados por cada recipiente:

- Datos fisicoquímico más relevantes
- Valores máximos de exposición en contacto y a 1 m de distancia de la superficie
- Fecha de la última medición
- Actividad

Según lo expresado en guía de seguridad del CSN 9.2 sobre residuos radiactivos se puede proceder según la tipología de residuo de la siguiente manera, para su gestión dentro de un centro hospitalario:

### **A. FUENTES RADIATIVAS FUERA DE USO**

En un centro hospitalario las fuentes radiactivas son las empleadas en gammagrafía, braquiterapia y generadores de  $^{99}\text{Mo}$ , Cuando ya no son aptas para su uso clínico pasan a ser un residuo radiactivo con alta actividad, por lo que su gestión es complicada. Normalmente su retirada se lleva a cabo por la misma empresa suministradora. Se debe minimizar el tiempo transcurrido desde su cese de uso hasta dicha retirada, y se mantendrá en todo momento en el mismo contenedor en que se aloja durante su uso normal, o en su defecto, en un contenedor de iguales características de blindaje. Así se minimiza el riesgo de dispersión del material o contaminación a terceros.

Si la empresa suministradora no puede hacerse cargo de la recogida de dicho material, se tendrá que hacer cargo una empresa autorizada, que en España es ENRESA.

Para los residuos generados, deberá llevarse un registro con los siguientes datos:

- Tipo de la fuente.
- Código de identificación.
- Radionucleido contenido en ella.
- Fecha de finalización de su uso.
- Actividad original y fecha.
- Actividad medida o calculada en la fecha de retirada.
- Tasa de dosis en contacto y a 1 metro del contenedor.
- Identificación del responsable de la evacuación.
- Identificación del receptor.

## B. MATERIALES RESIDUALES SÓLIDOS CON CONTENIDO RADIATIVO

Como consecuencia del uso de fuentes no encapsuladas se generan materiales residuales sólidos que contienen radionucleidos de muy baja actividad y un periodo de desintegración corto. En función del decaimiento de la actividad de dichos residuos, éstos pueden ser eliminados como residuos convencionales o como residuos radiactivos.

En la guía de seguridad del CSN 9.2 se establecen los niveles de actividad por debajo de los cuales los radionucleidos pueden ser considerados residuos no radiactivos. En este caso su retirada se realizará según la normativa de residuos sanitarios DF 181/1994 y guía NTP 838 INSHT. Para niveles mayores su gestión será como residuo radiactivo.

Esto implica la necesidad de una correcta segregación de los materiales contaminados para su evacuación posterior. Una correcta segregación será aquella que tenga en cuenta los criterios de tiempo de decaimiento del material radiactivo (según radionucleido) y destino final del material desechado.

Para aquellos materiales a los que se exija un periodo de decaimiento prolongado, se deberá disponer de un almacén ubicado fuera de las instalaciones y se ha de prever un recorrido de evacuación lo más alejado del público (pacientes) y menor recorrido posible. El transporte se debe realizar por personal autorizado y empleando métodos que alejen el foco de radiación del personal, como puede ser el empleo de carros de acero inoxidable. Estos residuos, así como sus contenedores deberán estar correctamente etiquetados para su correcta identificación, con la fecha de desecho para conocer si su decaimiento está en los niveles para poder ser considerado como no radiactivo.

Según lo expresado en la Guía de Seguridad 9.2 del CSN, deben llevarse a cabo registros adecuados para la gestión de los materiales residuales sólidos con contenido radiactivo, que estarán en todo momento actualizados y a disposición del CSN. Los registros propios del almacén estarán disponibles al menos, durante el tiempo que el material permanezca en el almacén. Los registros relativos a la evacuación deberán quedar archivados y permanecer bajo custodia del titular de la instalación al menos durante 5 años. [32]

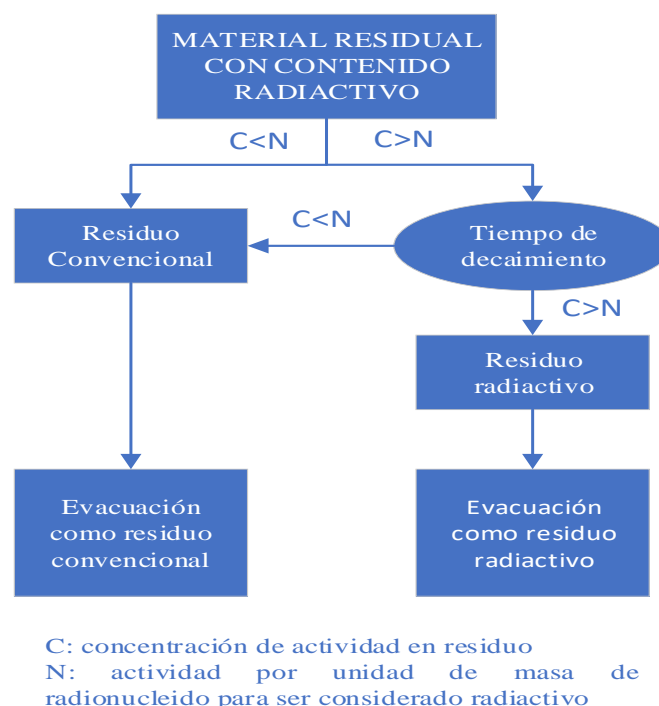


Figura 10: Esquema Gestión Residuos RI Sólidos

### C. MATERIALES RESIDUALES LÍQUIDOS

Los residuos radiactivos líquidos pueden provenir de soluciones o suspensiones acuosas de sustancias radiactivas, o de la evacuación o excretas de los pacientes sometidos a un tratamiento con isótopos no encapsulados.

Se debe diferenciar los líquidos de centelleo (con  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$  o  $^{35}\text{S}$ ) del resto (líquido acuoso). Asimismo, se deberá utilizar un contenedor para cada isótopo. Sólo se podrían mezclar soluciones compatibles químicamente y de período de semidesintegración del mismo orden.

Al igual que en los residuos sólidos, aquellas sustancias radiactivas procedentes de excreciones de pacientes y que una vez decaídas vayan a ser eliminadas por vía de evacuación convencional de aguas residuales urbanas, deberán permanecer en depósitos hasta que su concentración y tiempo de decaimiento lleven a un nivel de radiación admisible, siendo en su evacuación considerados como residuos no radiactivos.

Del mismo modo, es necesaria una correcta identificación de los residuos radiactivos y un almacenaje de los mismos en función de su retirada final. Para ello se debe tener en cuenta el periodo de decaimiento de cada uno de ellos, Los envases de almacenamiento deberán ser proporcionados por el SPR. En el caso de retirada por empresa especializada ENRESA se deberá atender a sus requerimientos para el almacenaje de los mismos.

## VIII. CASO PRÁCTICO

Se ha llevado a cabo el estudio de un servicio de Medicina Nuclear en un centro Hospitalario. Para contextualizarlo, se describen los puestos de trabajo en dicho servicio con las funciones que tienen asignadas y los focos principales de riesgo a que están sometidos como consecuencia de su trabajo con radiaciones ionizantes. Se incluyen además los datos de medición de dosis recibidas por los trabajadores durante un periodo de un año. De su estudio se elaboran las conclusiones pertinentes y posibles métodos de mejora.

### 1. Descripción del Centro de Trabajo

El servicio de Medicina Nuclear cuenta con sus propias instalaciones dentro del complejo hospitalario que se encuentra, por razones de seguridad, en la planta sótano del edificio. Las Figuras 11, 12 y 13 muestran un plano general de las instalaciones y las zonas de trabajo.



Figura 11: Plano General de Instalaciones Medicina Nuclear

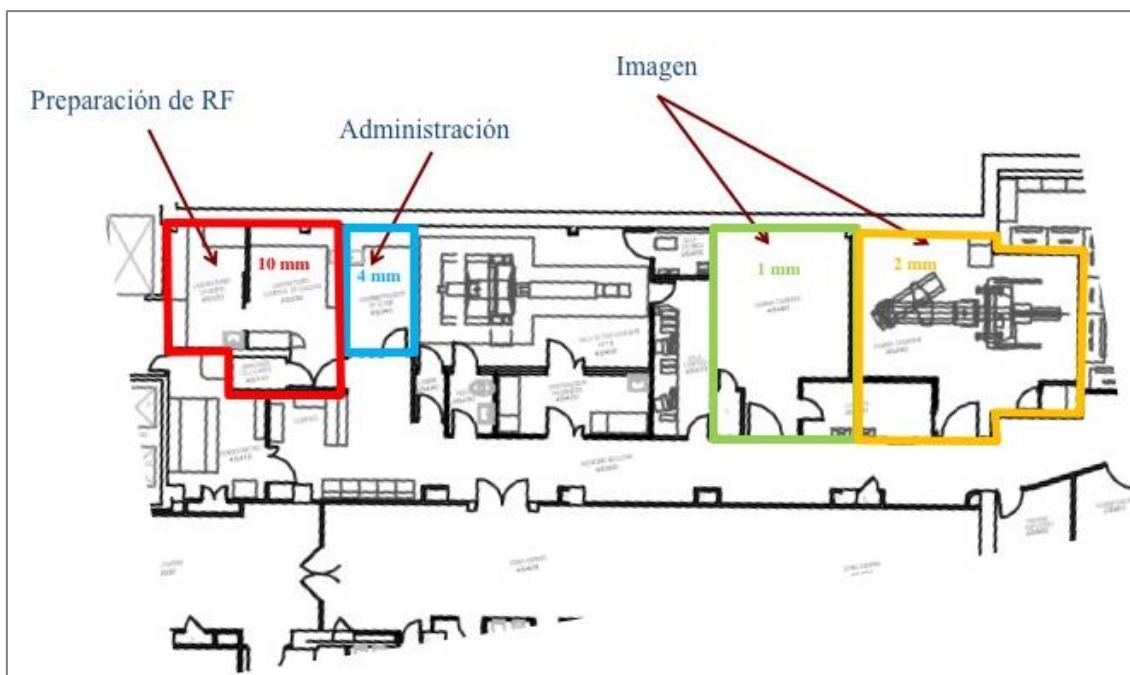


Figura 12: Zonas de Trabajo con Radiación Gamma

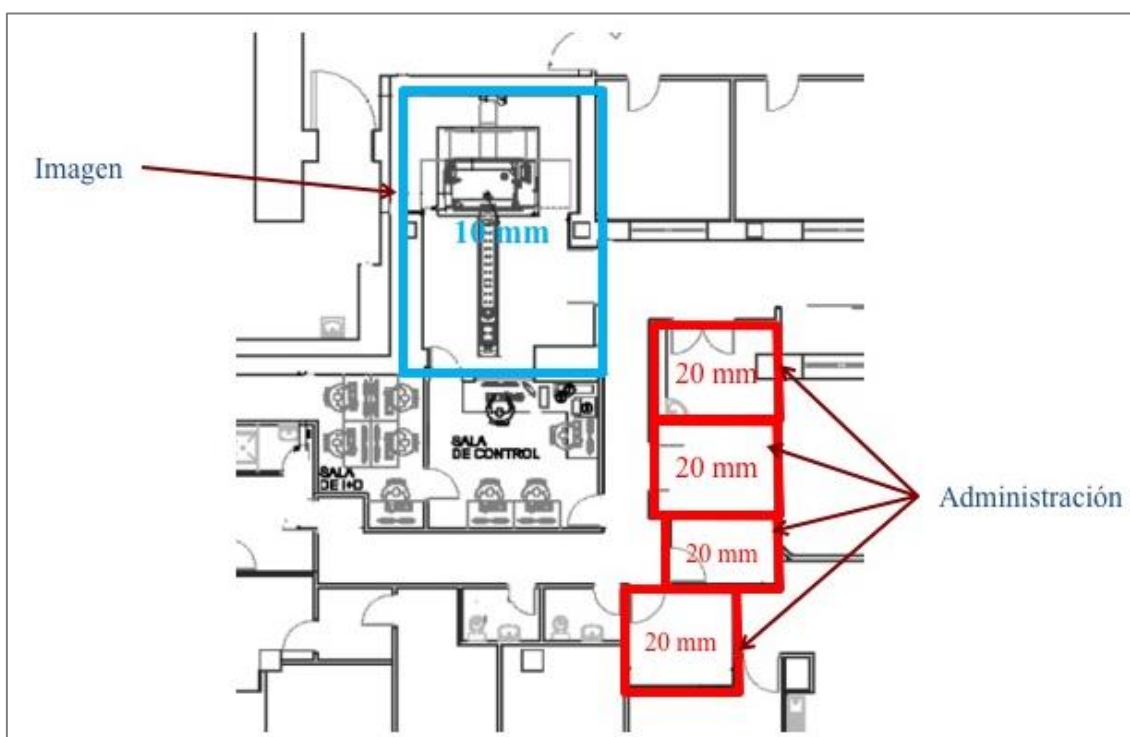


Figura 13: Zonas de Imagen y Administración de RF de PET

Las zonas de trabajo con radionucleidos son las siguientes:

**Cámara caliente- Laboratorio Nuclear** (*Fig 12 en rojo*)

Es la sala de preparación y monodosis de radiofármaco. También contiene la Gammateca donde se almacenan los radiofármacos y preparados de radionucleidos. Está protegida mediante paredes plomadas. También se almacenan en esta cámara los residuos con posible RI que se depositan en recipientes separados, en función del tiempo de decaimiento del radionucleido.

**Sala de administración de monodosis MN.** (*Fig 12 en azul*)

Se sitúa junto a la cámara caliente y es donde se le administra la monodosis/ radiofármaco de radiación gamma al paciente.

**Sala de administración de monodosis PET.** (*Fig 13 en rojo*)

Se sitúan junto a las respectivas cámaras PET. Es donde se administra el radiofármaco PET al paciente.

**Gammacámara y Cámara PET.** (*Fig 12 y Fig 13*)

Se trata del lugar donde se sitúa el paciente para realizar la prueba de gammagrafía y la prueba PET respectivamente. Existen dos cámaras para Gammagrafías y otras dos cámaras para PET. La cámara PET 1 se sitúa junto a la sala de monodosis y las cámaras para gammagrafías. Cada una de ellas cuenta con su propio blindaje de protección.

**Sala Ciclotrón.** (*Fig 11*)

Es el lugar en el que se obtiene el radionucleido de emisión de positrones. Está protegido por una pared de hormigón de 2 m de ancho, impidiendo así la emisión al exterior de RI. En el interior de la misma se realizan labores exclusivamente de mantenimiento.

**Laboratorio PET.** (*Fig 11*)

En este laboratorio se realiza la dosificación del radionucleido de emisión de positrones en el interior de celdas plomadas de manera informatizada. El marcaje del radiofármaco se realiza en otra celda o campana de protección de manera manual.

Además, en la zona destinada al Servicio de Medicina Nuclear podemos encontrar otras zonas donde se realizan trabajos sin exposición a RI:

**Sala de Control**

Junto a las salas de Gammacámara y Cámara PET existen unas salas de control desde donde las enfermeras controlan las pruebas sin riesgo de exposición a RI.

### **Sala de Imagen y Diagnóstico I+D**

Son los lugares en los que los médicos especialistas en Medicina Nuclear desarrollan la mayor parte de su actividad, analizando las imágenes que se obtienen de las distintas pruebas y realizando los diagnósticos.

### **Despachos, salas de reunión y zonas comunes**

## **2. Puestos de Trabajo**

En el desarrollo de la medicina nuclear, los puestos profesionales expuestos a los riesgos propios de la exposición a RI son los siguientes:

### **Técnicos de Laboratorio**

Son los encargados de preparar el radiofármaco en el Laboratorio de PET mediante la dosificación del radionucleido. El trabajo de dosificación se hace de manera informatizada por lo que durante este proceso solamente existe exposición cuando se hace necesaria alguna intervención manual, para lo cual usan guantes de nitrilo que desechan posteriormente.



*Figura 14: Laboratorio PET. Celdas de dosificación del radionucleido*

Tras dosificar el radionucleido se realiza el marcaje del kit frío en una campana o celda de protección que dispone de vidrio y paredes plomadas. Este proceso se hace de manera manual mediante el uso de pinzas de acero. Una vez elaborado el radiofármaco, el técnico procede a su encapsulación en una jeringuilla que se introduce en una jarra de plomo de 5 cm de espesor de pared y es llevada a una urna con doble puerta de vidrio plomado para ser recepcionada desde el exterior por el personal de enfermería.





*Figura 15: Laboratorio PET. Campana o Celda Para Marcaje del Kit Frío (Derecha en la imagen)*

Además, los Técnicos de Laboratorio efectúan labores de mantenimiento del Ciclotrón. Si es posible, estas labores se realizan al menos un día después de la última actividad realizada en el Ciclotrón, normalmente en lunes después de que no haya habido actividad desde el viernes, dejando así un espacio de tiempo que garantice la ausencia de radiactividad en el ambiente. Dado el riesgo de exposición, que es sumamente alto en el caso de una intervención de urgencia, al menos uno de los trabajadores que intervienen en dichas labores lleva un dosímetro de medición directa para controlar que el nivel de exposición no excede de los límites permitidos.

### **Radiofarmacéuticos**

Son los encargados del diseño de los radiofármacos. Su labor se desarrolla principalmente en despacho, siendo su exposición a la RI limitada a labores puntuales de trabajos de laboratorio en la experimentación de un radiofármaco nuevo.

### **Enfermeras PET**

Las enfermas de PET son las que trabajan con los radiofármacos procedentes del laboratorio de PET. Se encargan de recoger la dosis ya preparada en el laboratorio de PET, transfiriendo la jeringuilla desde la jarra en la que se encuentra a un cilindro de paredes de 5 cm de plomo mediante el uso de pinzas, para alejar la RI lo más posible de sus manos. Se protegen mediante guantes de nitrilo que posteriormente desechan.



*Figura 16: PET Recogida de Radiofármaco por Enfermera*

A continuación, la enfermera transporta la dosis en carro para alejarla lo más posible del cuerpo a la sala de preparación del paciente donde se inyecta mediante catéter ya preparado y sin retirar la jeringa de la protección del cilindro plomado.

Finalmente, tras un periodo de espera para que el radiofármaco se fije en el órgano diana específico, las enfermeras de PET se ocupan de la preparación del paciente para la toma de imágenes y se retiran de la sala para minimizar la exposición a las RI.

### **Técnicos de Protección Radiológica**

Son los responsables del cumplimiento de las exigencias del CSN en cuanto a las instalaciones, procedimientos y protocolos de actuación. Comprueban que el diseño del trabajo es el adecuado para minimizar al máximo la exposición de los trabajadores a las RI y se encargan de analizar los datos obtenidos en las diferentes mediciones. Su trabajo se desarrolla principalmente en despacho.

### **Radiofísicos**

Realizan el trabajo de campo de los Técnicos de Protección Radiológica y por tanto tienen un mayor riesgo de exposición a RI. Son los encargados de comprobar el correcto funcionamiento de las medidas de control de RI, verificando que se da cumplimiento a lo especificado por el Técnico de Protección Radiológica. Junto con los Técnicos de Protección Radiológica forman la Unidad de Protección Radiológica UPR.

### **Médicos**

Son los responsables del análisis de la información obtenida en las imágenes tanto procedentes de la gammacámara (emisión gamma), como de la PET cámara (emisión de

positrones) donde no están expuestos a la R.I. En algunas ocasiones administran determinados radiofármacos según la tipología del tratamiento en cuyo caso sí que puede haber exposición a las RI.

### **Enfermeras de MN**

Son las encargadas de la realización del marcaje de los Kits Fríos para la preparación de los radiofármacos, y su posterior administración al paciente.



*Figura 17: Marcaje Kit Frío por Enfermera MN en Cámara caliente*

Para minimizar la exposición a las RI, la jeringuilla que contiene el radiofármaco es introducida en una cápsula de plomo. La dosis es colocada en una bandeja de acero inoxidable con un papel absorbente y trasladada de esta manera a la sala contigua donde se encuentra el paciente, alejando de esta manera la fuente de la radiación de la enfermera y reduciendo los riesgos por contaminación.

En la sala de inyecciones se inyecta la dosis al paciente y la enfermera espera fuera de la sala a que el radiofármaco se fije en el órgano diana. La enfermera ayuda al paciente para la toma de imágenes en la gammacámara retirándose a una sala adjunta protegida mediante vidrio y paredes plomados. Una vez finalizada la prueba la enfermera retorna a la sala y acompaña al paciente hasta su salida.



*Figura 18: Dosis de Radiofármaco en la bandeja de transporte y Sala de Administración del Radiofármaco*

### **3. Focos del Riesgo**

En las instalaciones de Medicina Nuclear y en los laboratorios que utilicen fuentes no encapsuladas, los riesgos posibles son de irradiación externa y/o contaminación interna y externa. Las principales fuentes de radiación son los radionucleidos, emisores de radiación beta y/o gamma. Las localizaciones más susceptibles de riesgos de radiación y de contaminación son los siguientes:

#### **Cámara caliente- laboratorio Nuclear**

En este emplazamiento podemos encontrar la sala de preparación de monodoses de radiofármaco, así como la gammateca y la sala de almacenamiento de residuos (*Figuras 17, 19 y 20*). Debido al alto riesgo de radiación en los trabajos realizados en esta sala, los profesionales llevarán los EPI adecuados, como son el delantal plomado y guantes de nitrilo desechables (*Figura 19*).



*Figura 19: CÁMARA CALIENTE MN Gammateca, EPI: Delantales Plomados*



Figura 20: CÁMARA CALIENTE MN Depósitos Residuos RI

Al tratarse de una sala donde existe más probabilidad de presencia de RI en el ambiente, está provista de un detector aéreo que mide el nivel de radiación en la atmósfera así como un medidor de contaminación (Figura 21).

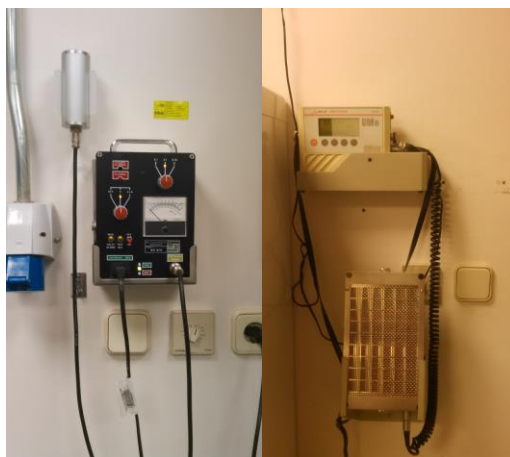


Figura 21: CÁMARA CALIENTE MN Medidor RI Aéreo y Medidor de Contaminación

El personal de enfermería de MN tiene que dejar anotadas las actuaciones relacionadas con la manipulación de radionucleidos, indicando el radiofármaco sintetizado, el radionucleido empleado, la hora de actuación y la actividad del mismo. De esta manera, el trabajo de laboratorio estará distribuido de modo que haya un reparto equitativo entre el personal, a fin de garantizar una mínima exposición para cada trabajador.

#### Sala de administración de monodosis

En esta sala no hay en principio fuentes de RI, solamente se produce el riesgo cuando la fuente de RI en forma de radiofármaco es llevada a dicha sala para ser suministrada al paciente.

Normalmente el tipo de administración del radiofármaco en esta sala es parenteral. Una vez inyectada la dosis, el paciente pasa a ser el principal foco de emisión de RI y por tanto el foco de riesgo, por lo que hay que minimizar el tiempo de estancia junto al mismo y mantener la mayor distancia posible, debiendo portar protección plomada cuando se está junto a él. La jeringuilla y aguja deben ser retiradas a un contenedor plomado situado en la misma sala.

### **Gammacámara y Cámara PET**

En ambos casos el foco emisor de RI es el propio paciente, por lo que hay que minimizar el contacto con el mismo. El personal debe salir de la sala a una sala adjunta quedando protegido por las paredes y el vidrio plomado hasta la finalización de la prueba. El riesgo de irradiación es mayor en la cámara PET al tener la radiación por emisión de positrones una actividad más elevada.

### **Laboratorio PET**

El proceso de dosificación del radionucleido no reviste riesgo de radiación o contaminación, salvo si es preciso intervenir de manera manual, para lo cual los trabajadores se protegen con guantes de nitrilo desechables. Una vez dosificado el radionucleido se transfiere otra celda o campana para el marcaje del radiofármaco. Se encapsula en un vial y se introduce en una jarra plomada de 5 cm de espesor de pared. En todo este proceso existe riesgo de contaminación y radiación, por lo que el personal debe llevar la protección adecuada. Debido a la alta actividad de las radiaciones por emisión de positrones, los delantales plomados son poco efectivos por lo que se utiliza instrumental como pinzas de acero para alejar la fuente de RI de la extremidad. (Figuras 14,15 y 16).

### **Áreas de adquisición de imagen**

Es la sala en la que el médico realiza el estudio de las imágenes que se obtienen de la gammagrafía y/ o PET. Suele estar protegida mediante paredes y vidrio plomado, y por tanto no presenta riesgo de exposición a RI.

### **Sala de espera** de pacientes a los que se les haya administrado el radiofármaco

En esta sala la fuente de radiación son los propios pacientes, que deberán permanecer aislados según el radionucleido suministrado. Se debe prestar especial atención a las posibles excreciones, que son un foco de radiación y contaminación.

**Habitaciones** de hospitalización de radioterapia metabólica. El personal que se ocupa de estos pacientes no pertenece al servicio de Medicina Nuclear, y aunque tiene su protocolo frente a riesgos de radiación y contaminación (categoría B), no es objeto de estudio en este trabajo.

### **Residuos Radiactivos**

El centro hospitalario del cual se han tomado los datos para el estudio del presente TFM, dispone de un procedimiento de gestión de Residuos Radiactivos, donde, atendiendo a lo descrito en el apartado 7.8 y dando así cumplimiento al RD 783/ 2001 capítulo V se han fijado las bases de la gestión de los residuos radiactivos.

En dicho centro la gestión de residuos radiactivos se establece de manera que, en primera instancia, se almacenan temporalmente en la propia instalación generadora (laboratorio de Radiofármacos Gamma y Laboratorio de PET). Posteriormente son entregados a la UPR para su traslado al almacén de Residuos Radiactivos, verificando que se han seguido los pasos correctos de segregación e identificación. Finalmente, si se verifica que la actividad del residuo decae lo suficiente, se evacuará como no radiactivo y de lo contrario será gestionado por empresa autorizada (ENRESA).

Todos los residuos radiactivos se confinan en recipientes adecuados, atendiendo a su actividad y estado y deben estar correctamente identificados. Existen especificaciones concretas para determinados Residuos Radiactivos atendiendo a sus características específicas, como es el caso de las bolsas de ropa con tratamiento de  $^{131}\text{I}$ , residuos líquidos de  $^{131}\text{I}$ , generadores de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , fuentes radiactivas encapsuladas de verificación de equipos, residuos PET, residuos del ciclotrón, etc.

## **4. Datos de Mediciones de RI**

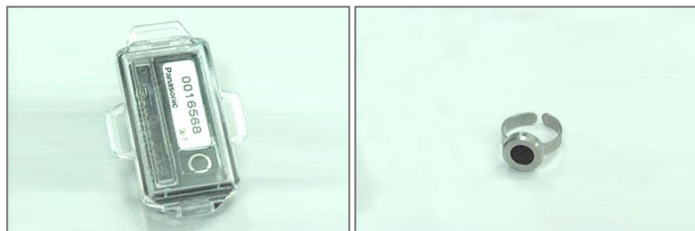
Los datos correspondientes a mediciones de exposición a RI que se muestran a continuación han sido facilitadas por el centro hospitalario donde se ha desarrollado el estudio del presente trabajo Fin de Master y corresponden al ejercicio de un año representativo.

Los datos se han obtenido de las mediciones de los dosímetros personales para cada uno de los profesionales del servicio de Medicina Nuclear. Se han nominado según la actividad que desempeñan seguido de un número por cada persona. Así se podrán ver las diferencias existentes en cuanto a exposición a radiaciones para el distinto personal de medicina nuclear.



Los dosímetros utilizados son de cuerpo en general y de manos (anillos), dado que son las extremidades que se ven sometidas a mayor riesgo de irradiación. Los dosímetros de cuerpo aportan dos mediciones, una superficial y otra profunda. No obstante, debido a que las dos medidas coinciden normalmente, se toman registros únicamente de la dosis profunda, registrándose la superficial si ésta varía significativamente con respecto a la dosis profunda.

La tipología de dosímetros individuales empleados por el centro hospitalario del cual se han tomado los datos para la realización del presente TFM es la de dosímetros de termoluminiscencia. Los dosímetros de cuerpo entero constan de 4 elementos: Dos de ellos son de  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  y los otros dos de  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ . Están soportados en portadosímetros de plástico que poseen una ventana de plástico delgada. En el caso de los anillos están constituidos por un elemento de  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$  introducido en el anillo.



*Figura 22: Dosímetro individual de cuerpo entero y de mano*

Se asignan dos dosímetros del tipo necesario por cada trabajador para su uso alternativo. Mensualmente se envían a un Servicio de Dosimetría Personal Externa autorizado por el Consejo de Seguridad Nuclear donde cada trabajador debe estar dado de alta para que dicho Servicio realice la medida.

Además de realizar mediciones de dosimetría para comprobar que los niveles de radiación son inferiores a los explicitados por la normativa vigente RD 783/2001, 20 mSv/año para cuerpo entero y 500 mSv/año en extremidades, el centro hospitalario ha establecido un procedimiento de calidad propio. Dicho procedimiento se engloba dentro de un sistema de mejora continua en el sistema de calidad integrada, donde se determinan unos valores umbral obtenidos de los históricos de las mediciones realizadas a lo largo de los años y que son bastante más ambiciosos que los marcados en la citada normativa (Tabla 7). De esta manera, se da cumplimiento a lo especificado por la Orden ECO 1449/2003 de 21 de mayo, “sobre gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en las instalaciones radiactivas de 2ª y 3ª categoría en las que se



manipulen o almacenen isótopos radiactivos no encapsulados”, artículo 5 donde se precisa la obligatoriedad de disponer de un sistema integrado de control de calidad.

Puesto de Trabajo	Umbral cuerpo	Umbral Manos
	mSv/ mes	mSv/ mes
Técnico de Laboratorio (TL)	0,40	15
Radiofarmacéutico (RF)	0,40	15
Enfermera PET (EnPET)	0,60	3
Radiofísico/ Técnico Protección Radiológica (Rd/ TPR)	0,20	1
Médico MN (M)	0,15	1
Enfermera MN (EnMN)	0,20	4

*Tabla 7: Límite Umbral Sistema de Calidad*

Como se ve en las Tablas 10 y 11, los niveles de radiación medidos, tanto de cuerpo entero como de manos son bastante inferiores a los límites umbral establecidos por la normativa vigente RD 783/2001, 20 mSv/ año para cuerpo entero y 500 mSv/ año en extremidades. Del mismo modo, estos valores son sensiblemente inferiores, salvo en casos puntuales, a los establecidos por el sistema de mejora continua del centro.

## Medición Cuerpo Profunda

UMBRAL		LIMITE DE DOSIS EFECTIVA UMBRAL RD 783/ 2001 TODO EL CUERPO: 20 mSV/año ≈ 1,67 mSV/ mes												
CALIDAD	2016													
PERSONAL CENTRO HOSPITALARIO	mSV/ mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
TÉCNICO LABORATORIO 1	0,40	0,00	0,21	0,00	0,56	0,00	0,31	0,00	0,00	0,11	0,32	0,00	0,17	1,68
		0,13	0,29	0,00	0,24	0,13	0,11	0,13	0,00	0,38	0,47	1,36	0,18	3,42
		0,68	0,14	0,20	0,37	0,00	0,24	0,14	0,00	0,16	0,00	0,14	0,17	2,24
		0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
						0,00	0,12	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,23
RADIOFARMACEUTICO 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,16
RADIOFARMACEUTICO 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	No envío		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14
RADIOFARMACEUTICO 3	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
ENFERMERA PET 1	0,60	0,28	0,31	0,28	0,47	0,26	0,28	0,20	0,43	0,13	0,34	0,23	0,28	3,49
ENFERMERA PET 2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,55	0,34	0,18	1,18
ENFERMERA PET 3		0,18	0,31	0,39	0,19	0,00	0,42	0,14	0,13	0,32	0,34	0,26	0,29	2,97
ENFERMERA PET 4		0,23	0,41	0,29	0,28	0,20	0,36	0,25	0,12	0,18	0,00	0,13	0,18	2,63
RADIOFÍSICO 1	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RADIOFÍSICO 2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RADIOFÍSICO 3		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,10
RADIOFÍSICO 4								0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TÉCNICO PROTECCIÓN RADIOLÓGICA 1							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 1	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 3		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 4		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 5		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 6		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MÉDICO 7		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ENFERMERA MN 1	0,20	0,18	0,16	0,19	0,10	0,30	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08
ENFERMERA MN 2		0,23	0,00	0,12	0,11	0,18	0,17	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,12	1,06
ENFERMERA MN 3		0,32	0,18	0,00	0,00	0,00	0,16	0,12	0,24	0,00	0,16	0,00	0,00	1,18
ENFERMERA MN 4		0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10

Tabla 8: Mediciones Mes de Radiación Cuerpo Profunda

## Medición Manos (máxima dcha izda)

UMBRAL CALIDAD 2016		LIMITE DE DOSIS EQUIVALENTE UMBRAL RD 783/ 2001 EN MANOS 500 mSV/ año ≈ 41,67 mSV/ mes												
PERSONAL CENTRO HOSPITALARIO	mSV/ mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
TÉCNICO LABORATORIO 1 TÉCNICO LABORATORIO 2 TÉCNICO LABORATORIO 3 TÉCNICO LABORATORIO 4 TÉCNICO LABORATORIO 5	15	8,61	5,81	9,88	11,73	1,36	23,69	4,00	3,73	10,41	9,21	6,21	13,29	107,93
		2,15	38,33	0,00	11,00	12,23	16,02	6,27	4,44	10,50	14,39	12,51	4,94	132,78
		11,54	5,78	19,09	12,20	5,15	16,02	8,20	1,70	4,64	3,86	7,52	10,49	106,19
		4,93	11,63	6,90	19,80	5,42	11,42	3,93	10,61	9,34	19,09	13,61	14,79	131,47
						13,71	13,03	2,26	10,15	10,15	10,73	19,57	11,49	91,09
RADIOFARMACEUTICO 1 RADIOFARMACEUTICO 2 RADIOFARMACEUTICO 3	3	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
		0,00	0,22	0,40	19,80	22,73	0,10	0,00	0,00	10,80	0,00	0,00	0,00	54,05
		4,95	4,81	0,00	11,30	0,00	0,24	1,48	4,01	4,19	0,42	4,81	0,00	36,21
ENFERMERA PET 1		0,59	1,97	1,15	2,00	1,02	1,33	0,72	2,51	0,43	1,59	0,66	1,88	15,85
ENFERMERA PET 2		0,16	0,34	1,23	0,00	0,00	0,29	0,39	0,00	0,57	1,00	1,73	0,57	6,28
ENFERMERA PET 3 ENFERMERA PET 4	1	0,78	0,89	0,00	0,60	0,25	1,15	0,58	0,47	1,20	0,86	1,05	0,72	8,55
		0,73	1,30	0,88	1,11	0,90	1,08	0,72	0,50	0,51	0,00	0,49	0,75	8,97
RADIOFÍSICO 1		0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
RADIOFÍSICO 2		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,37	0,00	0,56
RADIOFÍSICO 3		0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,30	0,00	0,00	0,00	2,77	0,00	3,43
RADIOFÍSICO 4	TÉCNICO PROTECCIÓN RADIOLÓGICA 1						0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
							0,12	0,31	0,38	0,48	0,20	0,49	0,65	2,63
ENFERMERA MN 1		1,18	1,91	3,37	1,42	2,72	2,09	1,82	1,60	2,26	2,27	2,31	0,78	23,73
ENFERMERA MN 2		1,59	1,19	1,31	1,96	1,66	1,08	1,22	0,52	1,56	1,35	1,35	1,01	15,80
ENFERMERA MN 3		3,82	3,41	1,47	0,12	0,00	2,20	2,11	5,73	2,43	4,01	4,31	3,45	33,06
ENFERMERA MN 4	1	1,76	2,27	0,75	3,15	1,85	1,32	0,84	1,44	1,41	2,35	1,29	1,49	19,92
MÉDICO 1		0,46	0,00	0,15	0,00	0,22	0,00	0,30	0,00	0,26	0,00	0,17	0,00	1,56

Tabla 9: Mediciones Mes Radiación en Manos

Los resultados presentados en la tabla 8 corresponden con “Mediciones en Cuerpo Profundas” y reflejan que la exposición queda muy por debajo del umbral dictaminado por el RD 783/ 2001 (20 mSV/ año), oscilando los valores anuales entre 0,00 mSV/ año y 3,49 mSV/ año, con una media 0,78 mSV/ año y un intervalo de 1,15 mSV/ año.

De la misma manera en la tabla 9 de “Mediciones en Manos” se puede apreciar que los valores, tanto mensuales como acumulados en el año, son bastante más bajos que el límite umbral fijado por el RD783/ 2001, (500 mSv/año), oscilando entre 0,00 mSV/ año y 132,78 mSv/ año, con una media total de 36,40 mSV/ año y una desviación de 45,79. Por todo ello se puede decir que la exposición en manos de los trabajadores ha sido baja, con un rango de valores de 132,78 mSV/ año.

A la vista de los resultados de ambas tablas, se puede hacer una diferenciación clara en cuanto a la dosis efectiva en función de los puestos de trabajo (figura 23). Los trabajadores que se ven expuestos a mayores índices de radiación son los Técnicos de Laboratorio PET, las Enfermeras PET y las Enfermeras MN. Sin embargo, el resto de profesionales apenas se ve expuesto a radiaciones ionizantes, más allá de la radiación de fondo. Tal es el caso del puesto de trabajo de Médico Especialista en Medicina Nuclear y de los Radiofísicos, por lo que el análisis de los datos se va a centrar en los puestos de trabajo con mayor exposición a las radiaciones ionizantes.

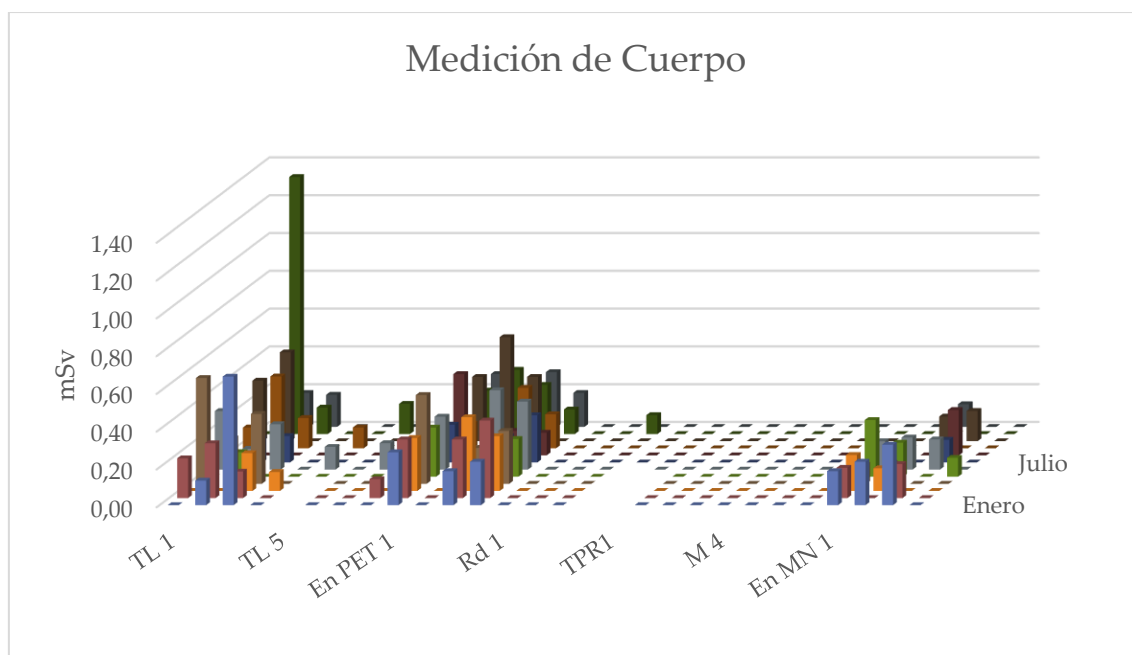


Figura 23: Mediciones Mensuales de Cuerpo Entero

En cuanto a la dosis efectiva de radiación medida en manos (Fig. 24) de nuevo se aprecia una diferencia significativa de exposición entre los diferentes puestos de trabajo.

Aquellos que reciben una mayor dosis en manos son de nuevo Enfermera PET, Enfermera MN y Técnico de Laboratorio PET, siendo este último el que más dosis recibe. También el puesto de Radiofarmacéutico ha recibido dosis elevadas en relación a otros puestos de trabajo, aunque de un modo más puntual que en los casos anteriormente descritos.

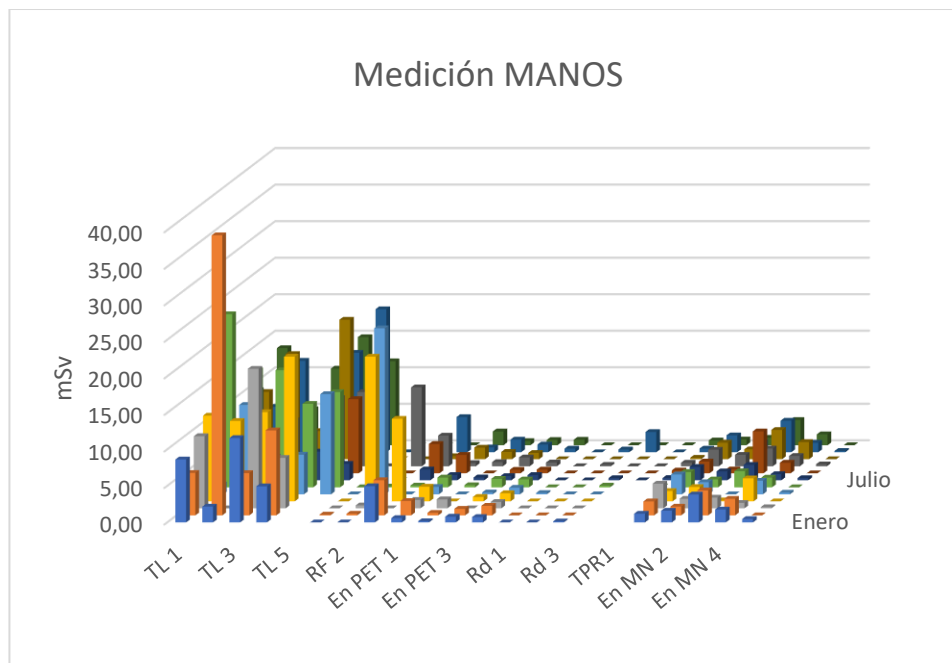


Figura 24: Mediciones Mensuales de Manos

#### *Técnico de Laboratorio. Análisis de Datos*

Los valores obtenidos de la medición de los dosímetros personales de los Técnicos de Laboratorio (TL), arrojan cifras mensuales inferiores al valor umbral establecido por la norma y un acumulado muy inferior. No obstante, si tenemos en cuenta el valor umbral mensual establecido por el sistema de calidad propio del centro, se puede apreciar que éste es superado en 4 ocasiones de un total de 36 (descartamos las mediciones de los TL 4 y 5 cuyas mediciones están muy por debajo del resto de trabajadores de ese perfil), lo que supone un 11,11% de casos por encima del umbral de calidad. Así pues, los valores anuales acumulados de los Técnicos de Laboratorio para exposición en cuerpo entero oscilan entre 1,68 mSv/ año y 3,42 mSv/ año, con una media de 2,45 mSv/ año y un rango de 1,74 mSv/ año, siendo el valor mensual más alto detectado de 1,32 mSv/ mes, el cual supera en 0,88 mSv/ mes el límite umbral establecido por el sistema de calidad.

En cuanto a las mediciones de exposición a las radiaciones en manos, en el perfil profesional de Técnico de Laboratorio, se puede apreciar que los datos son bastante

similares en todos los casos, a excepción del TL 5 del que no se dispone de datos de los 4 primeros meses. Los datos acumulados anuales son bastante inferiores al límite umbral establecido por la norma, pudiéndose observar una exposición que oscila entre los valores 106,19 mSv/ año y 132,78 mSv/ año, con una media de 119,59 mSv/ año y un rango de 26,59, con lo que el nivel de exposición queda lejos del umbral establecido por la norma de 500 mSv/ año para manos.

En cualquier caso, todas las medidas están por debajo de lo que supondría el umbral anual establecido en el RD 783/ 2001 prorrateado en 12 meses, esto es, 41, 67 mSv/ mes. Sin embargo, se observa que para el límite umbral fijado por el sistema de calidad de 15 mSv/ mes, hay 7 casos que lo superan de un total de 48, lo que supone un 14,58 %, siendo el valor mensual más alto obtenido de 38,33 mSv/ mes, superando en 23,33 mSv/ mes el valor umbral de la norma interna del centro.

#### *Enfermeras PET Análisis de Datos*

Aunque el valor mensual más alto en exposición en cuerpo se da en un caso puntual de un Técnico de Laboratorio, en la medición acumulada anual se puede ver que el perfil profesional con mayor exposición a radiaciones ionizantes en cuerpo entero es el de Enfermera PET, siendo muy similar al de Técnico de Laboratorio.

Los valores obtenidos en la medición acumulada anual de cuerpo entero oscilan entre 1,18 mSv/ año y 3,49 mSv/ año, con una media de 2,57 mSv/ año y un rango de 2,31, siendo por tanto inferior a lo establecido como valor umbral por el RD 783/ 2001 de 20 mSv/ año. Los valores obtenidos mensualmente están bastante por debajo del límite anual prorrateado mes a mes que fija la norma, el cual sería de 1,67 mSv/ mes, siendo la medición más alta obtenida de 0,55 mSv/ mes. Estos valores también están todos ellos por debajo del umbral establecido para este puesto de trabajo según el procedimiento de calidad del centro hospitalario, el cual es de 0,60 mSv/ mes.

En cuanto a la radiación en manos, los valores acumulados anuales oscilan entre los 15,08 mSv/ año y los 33,06 mSv/ año, con una media de 17,86 mSv/ año y un rango de 4,12 mSv/ año. Se trata de un valor muy por debajo del umbral fijado por la normativa de 500 mSv/ año y muy por debajo a su vez del valor de exposición que se da en el perfil de Técnico de Laboratorio. Los valores mensuales oscilan entre 0,00 mSv/ mes y 2,51 mSv/ mes, siendo el valor umbral fijado por el procedimiento de calidad de 3 mSv/ mes. En ningún caso se ha superado dicho umbral.

### Enfermeras Medicina Nuclear Análisis de Datos

La dosis efectiva acumulada anual de los puestos profesionales de Enfermera Medicina Nuclear para cuerpo entero ha oscilado entre los valores 0,10 mSv/ año y 1,18 mSv/ año, con una media de 0,86 mSv/ año y un rango de 1,08 mSv/ año quedando los valores muy por debajo del valor umbral de la norma que es 20 mSv/ año. Sin embargo, el límite umbral establecido por el procedimiento de calidad de 0,20 mSv/ mes para este perfil profesional, es superado en 4 ocasiones de 48, (8,3 %) siendo el valor máximo medido de 0,32 mSv/ mes.

La dosis equivalente en manos acumulada anual ha arrojado unos valores que oscilan entre 15,8 mSv/ año y 33,06 mSv/ año, con una media de 22,93 mSv/ año y un rango de 17,26, lo cual está muy por debajo del umbral del RD 783/ 2001 de 500 mSv/ año. Teniendo en cuenta los valores mensuales, se puede apreciar que todos ellos están muy por debajo del valor mensual de 41,66 mSv/ mes del acumulado anual fijado por la norma. En cuanto al umbral determinado por el procedimiento de calidad de 4 mSv/ mes, 3 valores han quedado por encima de un total de 48, lo que supone un 6,25 %, donde el valor más alto ha sido de 5,73.

A continuación se muestran los valores medios de las mediciones tanto en cuerpo como en manos para los diferentes puestos de trabajo. (Fig. 25 y 26)

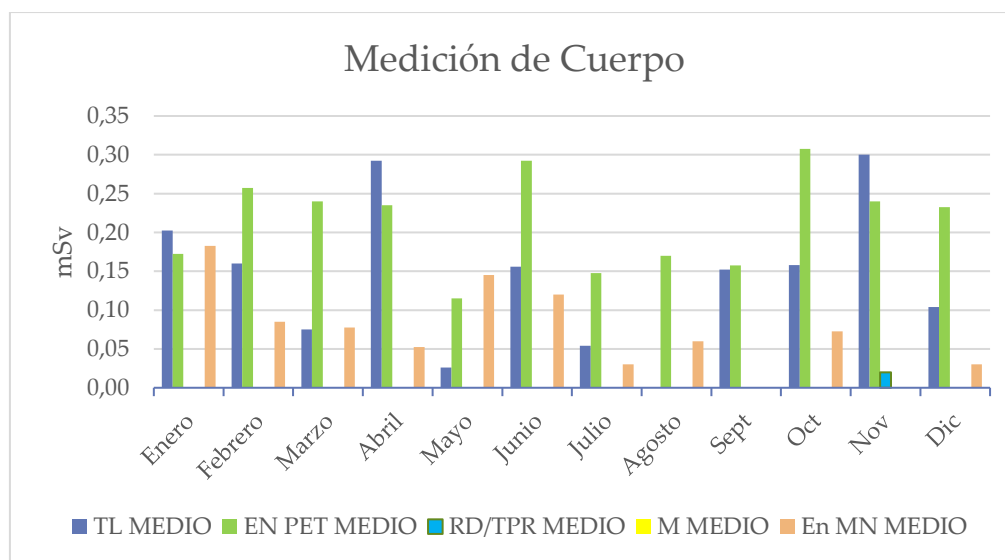


Figura 25: Valores medios mensuales de las Mediciones Mensuales de Cuerpo por puesto de trabajo

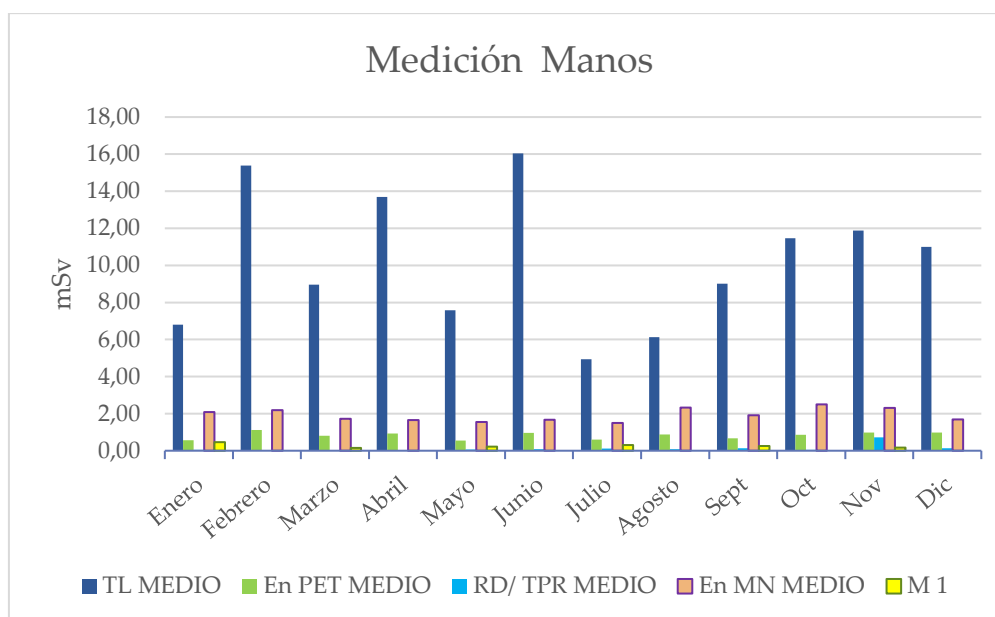


Figura 26: Valores medios mensuales de las Mediciones Mensuales de Cuerpo por puesto de trabajo

Como se puede apreciar en los gráficos de dosis acumulada anual media por puesto de trabajo, (Fig. 27 y 28), el puesto de trabajo que más exposición a la RI sufre es el de Técnico de Laboratorio en manos junto con el de Enfermera PET en cuerpo. Ello puede deberse al hecho de que trabajan con radiaciones de muy alta actividad como son las procedentes de positrones.

En cuanto a su alta exposición en manos, aunque normalmente, los *Técnicos de Laboratorio* trabajan detrás de las celdas y éstas les protegen de la radiación, existen dos factores que incrementan su exposición a las radiaciones dentro del trabajo de la preparación del radiofármaco, que son las intervenciones de urgencia en la dosificación del radionucleido, y el marcaje del fármaco para las que utilizan la protección de guantes de nitrilo desechables, en lugar de la protección de la barrera que suponen las paredes y vidrio plomado de las celdas con la que cuenta el resto del cuerpo.

En cuanto a la dosis efectiva acumulada en cuerpo en el puesto de trabajo de Técnico de Laboratorio, es probable que la exposición venga en mayor parte por los trabajos de mantenimiento del ciclotrón y por los momentos en que se dispone de menor protección frente a la radiación descritos anteriormente, ya que al tratarse de una radiación de alta actividad los delantales de plomo no ofrecerían una protección del todo efectiva, para lo que deberían ser mucho más gruesos haciéndolos poco prácticos.



Algo similar sucede con las *Enfermeras PET*; éstas se ven más expuestas a dosis efectiva acumulada anual en cuerpo que el resto de trabajadores. Esto puede ser debido a que, aunque el radiofármaco queda encapsulado en un cilindro de paredes de plomo, al inyectárselo al paciente éste se convierte en el foco de radiación, de alta actividad, que hace menos efectiva la protección del chaleco plomado.

Sin embargo, la dosis equivalente acumulada en manos de las *Enfermeras PET* es inferior a la recibida por las *Enfermeras MN*, pese a tratarse de radiación de alta actividad. A diferencia de las *Enfermeras MN*, las *Enfermeras PET*, no manipulan el radiofármaco, que está encapsulado incluso en el proceso de administración al paciente.

El siguiente perfil profesional con mayor exposición a radiaciones ionizantes es el de *Enfermera MN* que trabaja con radiaciones Gamma, con una actividad bastante más baja que la radiación por emisión de Positrones lo que hace más eficaz la protección de los chalecos plomados frente a este tipo de radiación. Sin embargo, las *Enfermeras de MN* realizan el marcaje del fármaco con las manos protegidas solamente por un guante de nitrilo (Fig. 18) lo que puede hacer que pese a trabajar con radiación de menor actividad que las enfermas PET, reciban una dosis efectiva en manos mayor.

En cuanto al puesto profesional de *Radiofarmacéutico*, éste desarrolla su actividad mayoritariamente en despacho, sin exposición a radiaciones ionizantes. También desarrolla trabajos de investigación en laboratorio para la elaboración y marcaje de nuevos radiofármacos y de ahí que puntualmente se den dosis efectivas en manos, que hacen de este perfil el segundo más expuesto a radiaciones en manos ya que la protección para la manipulación del radiofármaco es la del uso de guantes de nitrilo y pinzas de acero para alejar la fuente radiactiva de las manos.

Los *Radiofísicos* no trabajan directamente con las fuentes de radiación de manera habitual, por lo que su exposición tal y como se aprecia en la gráfica es muy baja, tanto en dosis efectiva en cuerpo como dosis equivalente en manos. Lo mismo puede decirse del *Técnico de Protección Radiológica*, cuya actividad se desarrolla principalmente en despacho.

Para los *médicos especialistas en Medicina Nuclear* la dosis efectiva anual media acumulada en cuerpo es igual a la radiación de fondo (Fig. 27), ya que durante el proceso de radiodiagnóstico permanecen en la sala protegida. En cuanto a la dosis equivalente acumulada en manos (Fig. 28), se puede apreciar que es muy baja, aunque ligeramente

por encima de la radiación de fondo, lo que puede deberse a los tratamientos con radiofármacos que el médico debe suministrar directamente.

En líneas generales, los análisis mensuales por puesto de trabajo apuntan a que el perfil profesional de Técnico de Laboratorio es el más expuesto a las radiaciones ionizantes. Aunque el valor medio de dosis para cuerpo entero es ligeramente inferior al de Enfermeras de PET, en lo que respecta a la radiación en manos, las dosis para el perfil profesional de Técnicos de Laboratorio son muy superiores al resto de puestos de trabajo, siendo el siguiente perfil profesional con mayor dosis mensual en manos el de Enfermeras Medicina Nuclear (Fig. 23 y 24).

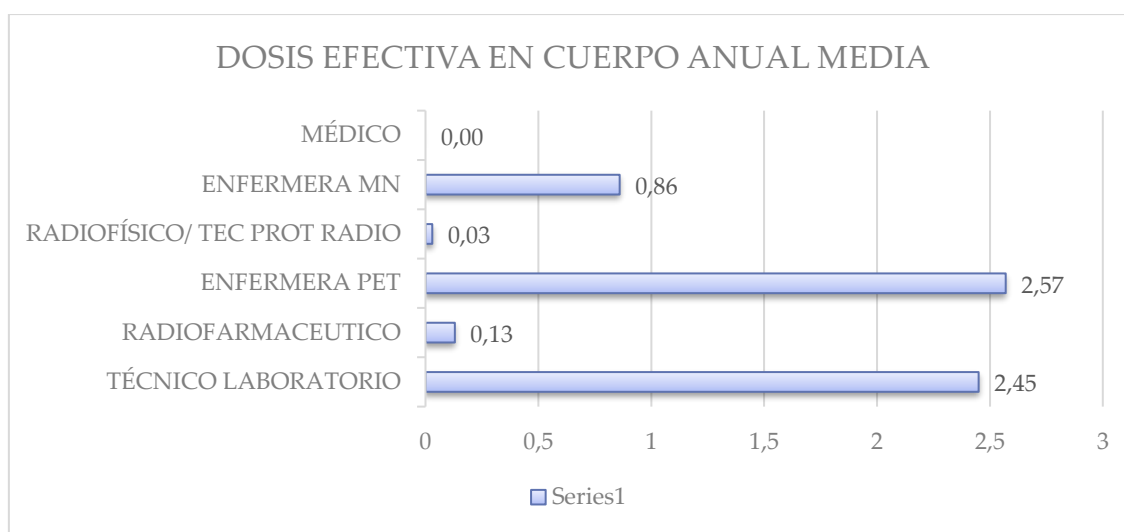


Figura 27: Gráfico Medias Anuales Cuerpo

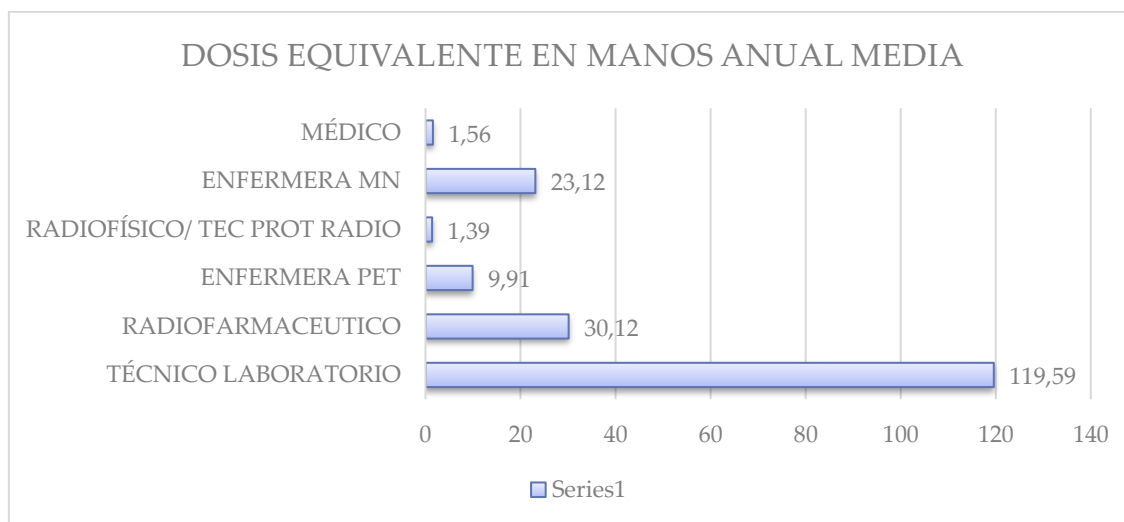


Figura 28: Gráfico Medias Anuales Manos

## IX. CONCLUSIONES

Tal y como se ha visto a lo largo de este trabajo, las radiaciones ionizantes pueden causar alteraciones celulares que pueden a su vez revertir en enfermedades de gravedad, tanto somáticas como hereditarias. El principal problema asociado a la exposición a las radiaciones ionizantes es que éstas no son perceptibles y, por tanto, no hay una constancia de la exposición al riesgo, lo que dificulta la protección de los trabajadores frente a las mismas.

Los valores de exposición a radiaciones ionizantes en Medicina Nuclear, y en el caso concreto analizado en este trabajo, quedan muy por debajo de los límites establecidos que puedan causar posibles daños inmediatos. Sin embargo, tal y como expresa el estudio “Cometa”, se dan más alteraciones cromosómicas en trabajadores de medicina nuclear que en otros, lo que puede dar lugar a daños estocásticos que degeneran en patologías graves. Por ello lo ideal para garantizar un entorno de trabajo seguro frente a las radiaciones ionizantes es que la exposición de los trabajadores a las mismas sea tendente a cero, es decir, que se encuentre dentro de los niveles de la radiación de fondo.

Para poder reducir la exposición a las radiaciones nucleares, se podría incidir en tres frentes:

### MEJORA EN LOS PROCESOS

- **Mejora de la Técnica en Procesos de Marcaje de Radiofármaco:** Se trataría de robotizar el proceso de marcaje de radiofármaco, tanto Gamma, como PET; esto reduciría el riesgo a exposición de RI en manos de los trabajadores de TL y EnMN, los cuales arrojan los valores más altos en dicha exposición. Esta medida podría aplicarse siempre y cuando estuviera dentro de la economía de prevención.

- **Estudio de las Causas de Intervención de Urgencia en Dosimetría de Radionucleido PET:** Como se ha visto, esta intervención puede ser una de las causas de mayor exposición a radiaciones ionizantes por parte de los TL, por lo que habría que realizar un análisis de las causas que conllevan a dichas intervenciones y valorar qué medidas de mejora en el proceso se pueden tomar para evitarlas.

### MEJORA EN INSTALACIONES Y EPIs

- **Modificación en las instalaciones.** Ubicando la zona PET 1 cerca de los laboratorios de PET se reduciría el tiempo de exposición de las enfermeras PET, al reducir el recorrido entre la recogida del Radiofármaco y la sala de administración de la dosis al paciente.

- **Estudio de nuevos materiales de protección** frente a las radiaciones ionizantes procedentes de la emisión de positrones que sean más eficaces que los actuales delantales plomados. Esta medida no depende del centro hospitalario, sino de la evolución de la tecnología y de posibles estudios a nivel internacional.

#### FORMACIÓN E INFORMACIÓN

- Siguiendo las directrices del CSN, en el centro hospitalario ya se realizan charlas formativas en referencia a la protección radiológica en los puestos de trabajo de la especialidad de Medicina Nuclear. No obstante, puede ser interesante la realización de **charlas participativas y entrenamientos** en la realización de los diferentes procesos de cada puesto profesional de la manera más eficiente, para garantizar que se realizan en el menor tiempo posible y con las mayores garantías de protección y alejamiento de las fuentes radiactivas.

- Con este mismo enfoque puede ser interesante **la realización de “brainstorming”** con la frecuencia que se estime oportuna (entre 6 meses o un año), con todo el personal que está más expuesto a las RI, sobre los procesos para la realización de su trabajo y posibles mejoras que los hagan más eficientes.

- **Concienciar a los trabajadores** sobre el hecho de que la primera persona que está al frente de su protección ante los riesgos derivados de su actividad profesional, son ellos mismos, además de fomentar su implicación en la consideración de posibles puntos mejorables.

## **X. BIBLIOGRAFÍA**

### *LEGISLACIÓN APLICABLE EN PREVENCIÓN DE PERSONAL SANITARIO*

- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.
- Ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales. BOE nº 269, 10/ 11/ 1995.
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones Nucleares radiactivas (modificado por el Real Decreto 35/2008, de 18 de enero, por el que se modifica el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas).

### *OTRA NORMATIVA Y LEGISLACIÓN DE POSIBLE APLICACIÓN O INTERÉS*

- Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, reformada por la Ley 33/2007 de 7 de noviembre.
- Real Decreto 1132/1990, de 14 de septiembre, por el que se establecen medidas fundamentales de protección radiológica de las personas sometidas a exámenes y tratamientos médicos.
- Real Decreto 413/1997, de 21 de marzo, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes por intervención en zona controlada.
- Real Decreto 1841/1997, de 5 de diciembre, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Medicina Nuclear.
- Real Decreto 1566/1998, de 17 julio, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Radioterapia.
- Real Decreto 1976/1999, de 23 diciembre, por el que se establecen los Criterios de Calidad en Radiodiagnóstico.
- Real Decreto 815/2001, de 13 de julio, sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas.

- Real Decreto 229/2006, de 24 de febrero, sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas.
- Ley 33/2007, de 7 de noviembre, de reforma de la Ley 15/1980, de 22 abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.
- Real Decreto 35/2008, de 18 de enero, por el que se modifica el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas Ionizantes.
- Instrucción de 30 de enero de 2008, del Consejo de Seguridad Nuclear, número IS-17, sobre la homologación de cursos o programas de formación para el personal que dirija el funcionamiento u opere los equipos en las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico y acreditación del personal de dichas instalaciones.
- Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de Rayos X con fines de diagnóstico médico.
- Instrucción IS-28, de 22 de septiembre de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría.

#### *BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA*

- [1] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD OMS, "Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección Nota descriptiva Abril de 2016," ABRIL 2016. [En línea]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es>. [Último acceso: 2 5 2016].
- [2] R. KITCHEN, Radio Frequency & Microwave radiation safety, Newnes, 1993, pág. 12.
- [3] CSN, "Interacción de la Radiación con la Materia., Introducción a las Radiaciones Ionizantes. Naturaleza y Tipos de Radiación.," 2012. [En línea]. Available: [http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/1838994721\\_1672013134047.pdf](http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1838994721_1672013134047.pdf). [Último acceso: 3 8 2014].

- [4] UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation," UNITED NATIONS PUBLICATION, New York, 2000.
- [5] X. ORTEGA ARAMBURU Y J. JORBA BISBAL, *Radiaciones Ionizantes: utilización y riesgos*, vol. 1, Barcelona: ediciones IPC, 1994, pág. 79.
- [6] CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR, *Las Radiaciones Ionizantes y Nuestros Genes*, Fundacion Genes y Gentes, 2003, pág. 16.
- [7] W. MANN, R. AYRES Y S. GARFINKEL, *Radioactivity & its measurement*, Pergamon, 1980.
- [8] D. R. MONDACA, "Por que Reducir las Dosis de Radiacion en Pediatria," vol. 12, nº 1, págs. 28-32, 2006.
- [9] UNSCEAR COMITÉ CIENTÍFICO DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS RADIACIONES ATÓMICAS, "Sources, Effects, and Risks of Ionizing Radiation," Nueva York, 1988.
- [10] J. WARD, "DNA Damage Produced by Ionizing Radiation in Mammalian Cells: identities, mechanisms, of formation and repairability," *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, vol. 35, págs. 95-125, 1988.
- [11] IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Biological Dosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose Assessment," IAEA, Viena, 1986.
- [12] ICRP, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Publicación 41 "Nonstochastic Effects of Ionizing Radiation"*, ICRP, New York, 1984.
- [13] F. METTLER Y A. UPTON, "Medical Effects of Ionizing Radiation," Grune & Stratton, New York, 1995.
- [14] J. STANNARD Y R. J. BAALMAN, "Radioactivity and health: A history," Richland, 1981.

- [15] A. MARTÍNEZ, M. COLEMAN, C. A. ROMERO-TALAMÁS Y S. FRÍAS, "DNA Damage by Occupational Exposure to Ionizing Radiation," *Revista Científica de Investigación Clínica*, vol. 62, nº 1, págs. 23-30, enero 2010.
- [16] OIT, "Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo," 20 febrero 2012. [En línea]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf>. [Último acceso: 06 febrero 2018].
- [17] NAS NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES AND NCR NATIONAL RESEARCHS COUNCIL, *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, N. A. Press, Ed., Washington, DC, 1990.
- [18] J. LUBIN, J. BOICE Y C. EDLING, "Radon and Lung Cancer Risk: A Joint Analysis of 11 Underground Miners Studies," NIH, Rockville, 1994.
- [19] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION UNSCEAR, "Sources and Effects of Ionizing Radiation Report to the General Assembly," UNITED NATIONS, New York, 1993.
- [20] ICRP, *Publicación 84 "Embarazo e Irradiación Médica"*, Pergamon, New York, 2000.
- [21] SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MEDICINA NUCLEAR E IMAGEN MOLECULAR, "semnim.es," 2015. [En línea]. Available: <http://www.semnim.es/pages/que-es-la-medicina-nuclear>. [Último acceso: 20 11 2017].
- [22] C. Y. CHAIN Y L. ILLANES, *Radiofármacos en medicina nuclear Fundamentos y aplicación clínica*, Buenos Aires: Edulp, 2015, págs. 6 y 7.
- [23] C. Y. CHAIN Y L. ILLANES, *Radiofármacos en medicina nuclear Fundamentos y aplicación clínica*, Buenos Aires: EDULP, 2015, pág. 7.
- [24] INSHT, "NTP 614: Radiaciones ionizantes: normas de protección," Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Madrid, 2003.
- [25] ICRP, *Publicación 103 "Las Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica"*, Senda Editorial S.A., Madrid, 2007.



- [26] S. ÁLAVAREZ ERVITI, M. I. FRANCÉS MELLADO, M. C. GUERGUE GÓMEZ, S. MIQUÉLEZ ALONSO, S. PELLEJERO PELLEJERO, A. RUBIO ARRÓNIZ, N. SAGÜES SARASA Y P. SOTO PRADOS, "Manual de prevención de riesgos laborales para los trabajadores del Servicio Navarro de Salud - Osasunbidea. Contaminantes físicos RADIACIONES IONIZANTES," Gráficas Ipar SL, Pamplona, 2003.
- [27] RADIOLOGYINFO.ORG, "radiologyinfo.org," [En línea]. Available: <http://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?pg=gennuclear>. [Último acceso: 3 11 2014].
- [28] ICRP, *Publicación 22* "Implications of Commission Recommendations that Doses be kept as Low as Readily Achievable," Pergamon Press, Ltd, OXFORD, 1973.
- [29] M. LÓPEZ Y A. MEDRANO, "Alara y la Excelencia," *Contacto Nuclear*, nº 32, págs. 4-8, 2003.
- [30] INSTITUTO NACIONAL DE LA SALUD. MINISTERIO DE SANIDAD Y CONSUMO, "Manual General De Protección Radiológica," 2002.
- [31] COMISION DE SALUD PÚBLICA CONSEJO INTERTERRITORIAL DEL SISTEMA NACIONAL DE SALUD, "Protocolos de Vigilancia Sanitaria Específica Radiaciones Ionizantes," [En línea]. Available: <https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/saludLaboral/vigiTrabajadores/protocolos.htm>. [Último acceso: 15 enero 2018].
- [32] CSN, *Guía de Seguridad 9.2* "Gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en instalaciones radiactivas," Imprenta Fareso, S. A., Madrid, 2001.